



**Sara Heloísa Neto
Vicente**

**Enchimento de uma Cavidade Parcialmente
Preenchida com um Meio Poroso**



**Sara Heloísa Neto
Vicente**

**Enchimento de uma Cavidade Parcialmente
Preenchida com um Meio Poroso**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Vítor António Ferreira da Costa, Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e sob a co-orientação científica do Professor Doutor Francisco Avelino da Silva Freitas, Professor Auxiliar do Departamento de Química da Universidade de Aveiro

Apoio financeiro do projecto
POCI/EME/59728/2004 no âmbito de
uma Bolsa de Assistente de
Investigação

o júri

presidente

Prof. Dr. José Joaquim Costa Cruz Pinto

Professor Catedrático do Departamento de Química da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. Vítor António Ferreira da Costa (Orientador)

Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. Francisco Avelino da Silva Freitas (Co-orientador)

Professor Auxiliar do Departamento de Química da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. Carlos Manuel Silva

Professor Auxiliar do Departamento de Química da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. António Rui de Almeida Figueiredo

Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra

agradecimentos

Desejo expressar o meu reconhecido agradecimento a duas pessoas sem as quais este trabalho não teria sido possível de concretizar – ao Prof. Doutor Vítor Costa, orientador científico do mestrado, pelo apoio, ensinamentos técnicos e científicos e pela disponibilidade que sempre demonstrou desde o início até esta fase mais atarefada da sua vida profissional, e ao Prof. Doutor António Sousa, orientador da bolsa de investigação, pela oportunidade que me facultou em conciliar a elaboração da tese de dissertação de mestrado com a bolsa de investigação, e pelo seu constante interesse mesmo nas alturas em que se encontrava ausente.

Agradeço também ao Prof. Doutor Francisco Avelino, co-orientador científico deste trabalho que, embora de Licença Sabática, aceitou amavelmente o convite para co-orientar este projecto.

Agradeço de forma especial ao Eng. Teles pelo incansável apoio, amizade, pela disponibilidade e paciência que demonstrou no decurso de todo o trabalho laboratorial.

Ao Mestre António Festas pelo contributo técnico na execução do trabalho experimental.

Ao Mestre Miguel Mendonça pela gentileza ao permitir a realização, no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra, dos testes de permeabilidade das espumas e cujo auxílio foi fundamental.

Ao Mestre Victor Neto, pela sua cortesia ao disponibilizar-se para filmar algumas experiências do escoamento de enchimento.

Ao Eng. Porfírio e ao Sr. Bastos, da SLOAP, pela disponibilidade demonstrada. À Lubfiltros pela cedência de alguns dos materiais necessários à realização das experiências.

Aos meus colegas Sofia e Noele que, embora sem qualquer envolvimento directo com o trabalho, me ajudaram e apoiaram com a sua amizade e incentivo.

Por último (mas não menos importante), e de uma forma muito especial, aos meus pais e ao Pedro pelo incansável apoio, incentivo e motivação, tanto nos bons como nos maus momentos.

palavras-chave

meio poroso, cavidade moldante, escoamento conjugado, “race-tracking”, simulação experimental, modelos numéricos, simulação numérica

resumo

O processo RTM é um método de fabrico de materiais compósitos em que é colocada uma fibra no interior de uma cavidade moldante fechada, para cujo interior é injectada uma resina que impregna e satura a fibra. Contudo, um dos problemas mais frequentes deste processo prende-se com o que se passa durante a etapa de enchimento. A eventual presença de pequenas folgas entre o meio poroso e as paredes da cavidade do molde pode conduzir à obtenção de peças com defeitos, pois essas zonas apresentam-se como regiões preferenciais para o escoamento, onde a resistência ao movimento da resina é menor, levando muitas vezes ao aparecimento de áreas por saturar com resina no interior do meio poroso.

Neste trabalho pretende-se construir uma instalação laboratorial para a simulação experimental do processo de enchimento de uma cavidade moldante parcialmente preenchida com um meio poroso. Pretende-se analisar o escoamento para diferentes velocidades de entrada do fluido, para diferentes larguras de canal e simular numericamente o processo de enchimento.

Para meio poroso utilizaram-se duas espumas à base de poliéster com 0,0125 m de espessura e uma em poliuretano com 0,015 m de espessura sujeitas a compressão de modo a perfazer uma espessura de 0,01 m (espessura da cavidade moldante). As permeabilidades das espumas foram obtidas experimentalmente através de uma técnica gravimétrica. A sua porosidade foi também determinada experimentalmente.

O estudo do enchimento foi realizado para as velocidades uniformes de entrada de 0,01 m/s e 0,02 m/s. Para ambas foi observado um escoamento preferencial (“*race tracking*”) pelos canais livres do meio poroso. A espuma em poliuretano ofereceu maior resistência ao escoamento por apresentar um valor de permeabilidade mais baixo ($8,23 \times 10^{-11} \text{ m}^2$).

Ao aumentar a largura do “*gap*” ou ao diminuir a permeabilidade do meio poroso, o escoamento através dos canais laterais é mais acentuado.

A espuma em poliuretano revelou-se ser a mais representativa em relação ao que se passa na etapa de enchimento do processo RTM dada a maior semelhança entre as suas propriedades e as propriedades das fibras.

Os resultados numéricos ainda diferem substancialmente dos experimentais pelo que se conclui que é necessário melhorar e validar o modelo matemático e/ou numérico utilizado.

keywords

porous medium, mold cavity, coupled flow, “race-tracking”, experimental simulation, numerical models, numerical simulation

abstract

RTM process is a manufacturing method of composite materials in which a fibre is located inside a closed mold cavity, for whose interior a resin that impregnates and saturates the fibre is injected. However, one of the most frequent problems of this process is related with the filling stage. The possible existence of small gaps between porous medium and mold cavity walls can lead to parts with defects, because in the gaps the flow is preferential and the resin flow resistance is smaller, leading many times to appearance of areas not saturated with resin inside porous medium.

The goal of this thesis is to build an experimental installation to simulate the filling process into a mold cavity partially filled with a porous medium. It is intended to study the flow for different fluid inlet velocities, for gaps with different widths, and to numerically simulate the filling process.

Two Polyester based foams of thickness 0,0125 m and one Polyurethane foam of thickness 0,015 m of were used as porous media. The foams were compressed until 0,01 m thickness because this is the thickness of the mold cavity. The foam permeabilities were obtained experimentally using a gravimetry technique. Foam porosities were also experimentally determined.

The filling study was realized for uniform inlet velocities of 0,01 m/s and 0,02 m/s. For both inlet velocities a preferential flow through the gaps (race tracking) was observed. Polyurethane foam offered greater resistance to flow because it presents the lowest permeability value ($8,23 \times 10^{-11} \text{ m}^2$).

Flow near the borders of the mold is more intense increasing the gap width or decreasing the porous medium permeability.

Polyurethane foam was the most representative in concerning to RTM filling process stage, as its properties are closer to that of usual fibres.

The numerical results still differ substantially relative to experimental results. Thus, one concludes that is necessary to improve and to validate the mathematical and/or numerical models.

Lista de Acrónimos

LCM	Liquid Composite Molding
RTM	Resin Transfer Molding
CV/FEM	Control Volume/Finite Element Method
FE	Finite Element
CV	Control Volume
ppi	pores per inch
PVC	Policloreto de Vinilo

Lista de Símbolos

∂	Derivada parcial
x	Coordenada x
ρ	Massa volúmica
u	Velocidade
t	Tempo
p	Pressão
μ	Viscosidade dinâmica
g	Aceleração da gravidade
C_p	Calor específico a pressão constante
T	Temperatura
k	Condutividade térmica
\dot{q}_g	Taxa volumétrica de geração de calor
ε	Porosidade
μ_B	Viscosidade de Brinkman
F	Coeficiente Forchheimer
K	Permeabilidade
$ \vec{V} $	Módulo do vector velocidade
Re_k	Número de Reynolds baseado na permeabilidade
\vec{V}	Vector velocidade
∇	Gradiente

h_v	Coeficiente de transferência de calor por convecção
a_v	Área superficial do meio poroso por unidade de volume
Φ	Taxa de dissipação viscosa
\dot{G}	Taxa volumétrica de geração de calor pela reacção de cura da resina
Δh	Entalpia específica da reacção de cura
\dot{m}	Taxa de cura da resina
α	Grau de cura da resina
\vec{n}	Vector unitário normal à interface
σ	Tensor das tensões
\vec{t}	Vector unitário tangente à interface
σ_{ij}	Tensão total
δ_{ij}	Função δ de Kronecker
q''	Fluxo de calor
T_0	Temperatura da interface
a	Parâmetro adimensional
f	Factor de enchimento, ou fracção volúmica
K_1, K_2	Constantes cinéticas
E_1, E_2	Energias de activação
m_1, m_2	Ordens da reacção
A_1, A_2	Factores pré-exponenciais
R	Constante universal dos gases
μ_0	Constante do modelo empírico da viscosidade

E_U	Constante do modelo empírico da viscosidade
z	Constante do modelo empírico da viscosidade
F	Força
A	Área
p_i	Pressão exercida no interior da cavidade moldante
p_{atm}	Pressão atmosférica
p_r	Pressão relativa
e_0	Espessura inicial
e_f	Espessura final
V_{vazios}	Volume de vazios
V_{total}	Volume total
m	Declive
y	Coordenada y
b	Ordenada na origem
Δ	Variação
A'	Distância entre a cota 1 e a cota 2
B'	Distância entre a cota 2 e a cota 3 / espessura do disco em PVC
C'	Distância entre a cota 3 e a cota 4
D'	Distância entre a cota 4 e a cota 5 / espessura do disco em acrílico
Q_m	Caudal mássico
N_1	Número de furos no disco de PVC
D_f	Diâmetro dos furos
D_i	Diâmetro interno do porta-amostras
N_2	Número de furos do disco em acrílico

$m_{p-amostras}$	Massa do porta-amostras
$m_{sólido}$	Massa da espuma seca
m_{ar}	Massa de ar
$m_{água}$	Massa de água
$V_{água}$	Volume de água
V_{ar}	Volume de ar
V_{vazios}	Volume de vazios
V_{total}	Volume total
$V_{amostra}$	Volume da amostra
Δl_x	Espaçamento da malha segundo a direcção x
u_{max}	Velocidade máxima segundo a direcção x
H	Largura da cavidade moldante
L_g	Largura do “gap”
L	Comprimento útil da cavidade moldante

índices

i, j	Índices usados na notação indicial
r	Resina
f	Fibra
dl	Domínio livre
dp	Domínio poroso

Índice

	Pág.
Constituição do júri.....	i
Agradecimentos.....	iii
Palavras-chave e resumo.....	v
Keywords e abstract.....	vii
Lista de acrónimos.....	ix
Lista de símbolos.....	xi
Índice.....	xv
Índice de figuras.....	xvii
Índice de tabelas.....	xxi
1 Introdução.....	1
1.1 Considerações preliminares.....	1
1.2 Enquadramento e motivação.....	3
1.3 Objectivos.....	4
2 Processo RTM.....	7
2.1 Descrição do processo.....	7
2.2 Relevância do processo.....	12
2.3 Fenómeno “ <i>race tracking</i> ” e suas implicações.....	14
2.4 Modelação matemática do processo.....	15
2.4.1 Estágio de enchimento.....	16
2.4.1.1 Modelação numérica.....	22
2.4.2 Estágio de cura.....	24
2.4.3 Variáveis do processo.....	25
3 Metodologia experimental.....	27
3.1 Descrição da instalação experimental.....	27
3.2 Operação da instalação experimental.....	31
3.3 Determinação da permeabilidade das espumas.....	34
3.4 Determinação da porosidade das espumas escolhidas.....	37
4 Resultados e discussão.....	39

4.1 Testes de vedação do molde.....	39
4.2 Simulação experimental do processo de enchimento.....	40
4.2.1 Análise do escoamento para diferentes velocidades de entrada.....	41
4.2.2 Análise do escoamento para diferentes larguras do canal.....	47
4.3 Simulação numérica do processo de enchimento.....	50
4.3.1 Análise do escoamento para diferentes larguras do canal.....	54
4.4 Comparação dos resultados experimentais e numéricos.....	60
5 Conclusões e sugestões para trabalho futuro.....	63
5.1 Contribuições deste trabalho.....	63
5.2 Sugestões para trabalho futuro.....	65
Bibliografia.....	67
Apêndice.....	71
A.1 Desenhos técnicos ilustrativos das peças que constituem a célula acrílica.....	71
A.2 Ficha técnica do óleo.....	73
A.3 Cálculo das permeabilidades.....	76
A.4 Cálculo das porosidades.....	83
A.5 Filmes obtidos para cada um dos processos de enchimento.....	85

Índice de figuras

	Pág.
Figura 1.1 Classificação dos materiais compósitos consoante o tipo de reforço utilizado.....	2
Figura 2.1 Esquematização de algumas formas de fazer chegar a resina à cavidade moldante durante o processo RTM, (a) a resina e o agente de cura são injectados após serem misturados, (b) injeccção directa da resina pré-misturada com o agente de cura, (c) aplicação directa de um gás sob pressão sobre a resina pré-misturada.....	8
Figura 2.2 Estratégias de injeccção de resina, (a) uniaxial (lento), (b) radial, (c) convergente (mais rápido).....	9
Figura 2.3 Esquematização do processo RTM.....	10
Figura 2.4 Histórico de temperatura típico de um ciclo RTM.....	12
Figura 2.5 Alguns exemplos de áreas de aplicação do processo RTM.....	14
Figura 2.6 Subdivisão da malha FE em volumes de controlo.....	23
Figura 2.7 Factores de enchimento para modelo parcialmente preenchido.....	24
Figura 3.1 Molde em vidro acrílico incolor.....	28
Figura 3.2 Bancada metálica.....	31
Figura 3.3 Esquematização simplificada da montagem experimental.....	32
Figura 3.4 Esquematização de um corte longitudinal sobre a área útil da cavidade moldante.....	33
Figura 3.5 Montagem experimental utilizada para a determinação da permeabilidade das espumas - recipiente contendo água, suporte, porta-amostras, recipiente colector da água e balança.....	35

Figura 3.6	Porta-amostras, (a) vista superior do porta-amostras, onde é possível observar o disco perfurado em PVC, (b) vista inferior do porta-amostras onde é possível visualizar o parafuso móvel, (c) porta-amostras conectado ao tubo de plástico que provém do recipiente que contém água.....	35
Figura 3.7	Amostras de espuma, (a) amostra de poliuretano com espessura 0,015 m, (b) amostra de poliéster 30 ppi com espessura 0,0125 m, (c) amostra poliéster 15 ppi com espessura 0,0125 m.....	37
Figura 4.1	Estrutura em acrílico com grampos metálicos de ajuste e reforço.....	40
Figura 4.2	Esquematisação da geometria do molde preenchido parcialmente com o meio poroso.....	42
Figura 4.3	Frentes do escoamento experimental para a velocidade de 0,01 m/s e “gap” de 0,005 m, (a) espuma de poliuretano, (b) espuma à base de poliéster de 30 ppi, (c) espuma à base de poliéster de 15 ppi.....	43
Figura 4.4	Exemplificação do escoamento transverso.....	45
Figura 4.5	Frentes do escoamento experimental para a velocidade de 0,02 m/s e “gap” de 0,005 m, (a) espuma de poliuretano, (b) espuma à base de poliéster de 30 ppi, (b) espuma à base de poliéster de 15 ppi.....	46
Figura 4.6	Frentes do escoamento experimental para a espuma em poliuretano com “gap” de 0,005 m.....	48
Figura 4.7	Frentes do escoamento experimental para a espuma em poliuretano com “gap” de 0,01 m.....	49
Figura 4.8	Resultados numéricos para a espuma em poliuretano com um “gap” de 0,005 m.....	56
Figura 4.9	Resultados numéricos para a espuma em poliuretano com um “gap” de 0,01 m.....	59
Figura 4.10	Perfis de velocidade na zona “gap”, (a) na entrada, (b) a meio do comprimento da cavidade moldante, (c) na saída.....	60
Figura III.1	Representação dos dados obtidos relativos às variáveis tempo <i>versus</i> massa e representação da recta resultante da aplicação do método dos mínimos quadrados a esses dados para o ensaio 1.....	76

Figura III.2	Representação dos dados obtidos relativos às variáveis tempo <i>versus</i> massa e representação da recta resultante da aplicação do método dos mínimos quadrados a esses dados para o ensaio 2.....	76
Figura III.3	Representação dos dados obtidos relativos às variáveis tempo <i>versus</i> massa e representação da recta resultante da aplicação do método dos mínimos quadrados a esses dados para o ensaio 3.....	77
Figura III.4	Representação dos dados obtidos relativos às variáveis tempo <i>versus</i> massa e representação da recta resultante da aplicação do método dos mínimos quadrados a esses dados para o ensaio 4.....	77
Figura III.5	Representação dos dados obtidos relativos às variáveis tempo <i>versus</i> massa e representação da recta resultante da aplicação do método dos mínimos quadrados a esses dados para o ensaio 5.....	78
Figura III.6	Representação dos dados obtidos relativos às variáveis tempo <i>versus</i> massa e representação da recta resultante da aplicação do método dos mínimos quadrados a esses dados para o ensaio 6.....	78
Figura III.7	Representação dos dados obtidos relativos às variáveis tempo <i>versus</i> massa e representação da recta resultante da aplicação do método dos mínimos quadrados a esses dados para o ensaio 7.....	79
Figura III.8	Cotas envolvidas na montagem experimental para a determinação das permeabilidades.....	80

Índice de tabelas

		Pág.
Tabela 3.1	Propriedades físicas de cada tipo de espuma utilizado como meio poroso.....	29
Tabela 3.2	Valores de permeabilidade determinados.....	36
Tabela 3.3	Valores de porosidade determinados.....	38
Tabela 4.1	Dimensões das espumas utilizadas na simulação experimental do processo de enchimento.....	41
Tabela 4.2	Dimensões das espumas utilizadas no escoamento para diferentes larguras do “gap” e dimensões deste.....	47
Tabela III.1	Compilação dos parâmetros m (declive) e b (ordenada na origem) de cada recta resultante da aplicação do método dos mínimos quadrados..	79
Tabela III.2	Compilação dos dados do porta-amostras.....	82
Tabela III.3	Compilação de outros dados necessários ao cálculo das permeabilidades.....	82
Tabela IV.1	Massas volúmicas da água e do ar.....	83
Tabela IV.2	Massas obtidas dos conjuntos amostra+porta-amostras.....	83

Capítulo 1

Introdução

Desde os primórdios da civilização que os materiais têm desempenhado um papel fundamental na vida da Humanidade. Inicialmente, o Homem apenas tinha acesso aos materiais que encontrava directamente na Natureza mas, com o decorrer do tempo, a pesquisa e o desenvolvimento de novos processos permitiram criar novos materiais, capazes de satisfazer as exigências requeridas pela sociedade em crescente progresso.

Engenheiros e cientistas das mais variadas áreas trabalham com a finalidade de criar novos materiais, ou modificar propriedades de outros já existentes (Smith, 1996).

Dentre as mais diversas classes de materiais destaca-se, devido à sua importância a nível de engenharia, a dos materiais compósitos, que ocupa um lugar na vanguarda da tecnologia.

1.1 Considerações preliminares

Um material compósito é uma combinação de dois ou mais compostos com diferentes composições químicas, geralmente insolúveis entre si, e que podem ser fisicamente identificados por uma interface entre os componentes. A maioria destes materiais é constituída por um enchimento seleccionado ou um material de reforço e uma matriz, geralmente polimérica (resina), compatível de modo a obter as características específicas e propriedades desejadas (Smith, 1996).

Os compósitos podem ser classificados de diversas formas. Uma classificação esquemática simples consiste em separá-los de acordo com o tipo de reforço (Figura 1.1) utilizado no seu fabrico – reforçados com partículas ou reforçados com fibras (mais comum). Os compósitos reforçados com fibras podem ainda ser divididos naqueles que contêm fibras contínuas (longas) ou descontínuas (curtas), e surgiram como resposta à pressão sentida sobretudo pela comunidade aeroespacial em criar materiais que

apresentassem um desempenho melhorado face a outros. As fibras contínuas podem apresentar diferentes arranjos de modo a conferir ao material compósito as propriedades mecânicas desejadas. Assim, podem ser dispostas de uma forma unidireccional, bidireccional ou multidireccional.

Compósitos		
reforço de partículas	reforço de fibra	
	fibras descontínuas (curtas)	fibras contínuas (longas)
		unidireccionais
		bidireccionais
		multidireccionais

Figura 1.1 Classificação dos materiais compósitos consoante o tipo de reforço utilizado.

Os compósitos poliméricos com fibras de reforço são, actualmente, uma classe importante de materiais utilizados nas mais diversas áreas de aplicação: aeroespacial, marinha, sector automóvel, desporto, recreio, infraestruturas, entre outras. A crescente popularidade destes materiais deve-se às múltiplas vantagens que oferecem, tais como reduzido peso, durabilidade, resistência à corrosão e ao impacto, facilidade de fabrico, excelente relação do binómio peso/performance, bom isolamento térmico e acústico, baixa condutividade térmica e flexibilidade de design, permitindo a obtenção de geometrias complexas com baixos custos de investimento (Ni *et al.*, 1996).

As propriedades das fibras de reforço geralmente determinam as características mecânicas dos compósitos. Os materiais candidatos a reforços são a fibra de vidro, a fibra de carbono e a fibra de aramida ou de Kevlar, como é comercialmente conhecida. A matriz actua como um meio de transferência de pressão para o reforço e é responsável pela coesão do material. Uma boa adesão da matriz às fibras é determinante para a qualidade do compósito (Ni *et al.*, 1996).

Existem diversas técnicas de processamento utilizadas no fabrico de materiais compósitos. Na prática industrial são encontradas muitas variantes dessas técnicas

principais, bem como muitos processos híbridos. O tipo de técnica usada numa aplicação particular dependerá, entre outras coisas (Bower, 2007):

- do número de peças a produzir;
- das condições disponíveis;
- da repetição das peças que se pretendem produzir;
- das propriedades mecânicas requeridas nas peças finais;
- dos materiais (resina e reforço) a serem usados;
- do tamanho da peça.

A técnica LCM (*“Liquid Composite Molding”*) é um processo atractivo para o fabrico de grandes volumes de materiais compósitos. Nesta técnica, a fibra de reforço apresenta-se totalmente seca antes da moldagem. A resina é injectada para o interior de um molde de modo a impregnar a fibra nele contida, e sofre uma reacção de cura antes de se retirar o compósito do molde.

Dos vários processos pertencentes à técnica LCM destaca-se o processo RTM (*“Resin Transfer Molding”*), o mais utilizado para a produção em massa de materiais compósitos avançados, com geometrias complexas e de dimensões consideráveis (Ni *et al.*, 1996).

1.2 Enquadramento e motivação

O processo RTM tornou-se muito utilizado para o fabrico de materiais compósitos, devido essencialmente à capacidade de produção de peças com formas complexas e ao facto de requerer baixas pressões de operação. Neste processo o meio poroso (geralmente uma fibra) é colocado no interior de uma cavidade moldante que posteriormente é fechada, e é injectada para o seu interior uma resina que impregna e satura o meio poroso. Seguem-se as etapas de consolidação da peça, durante a qual ocorre a cura da resina, após terminado o processo de enchimento, e, por fim, o arrefecimento da peça.

Um dos problemas mais frequentes na utilização deste processo prende-se com o que se passa durante a etapa de enchimento. A eventual presença de pequenas folgas entre o meio poroso e as paredes da cavidade do molde, causadas por diversos motivos como deslocações da fibra durante o escoamento do fluido, corte imperfeito das fibras, ou

simplesmente um acomodamento deficiente da fibra ao interior da cavidade, pode conduzir à obtenção de peças com defeitos. Aquelas zonas de folga apresentam-se como regiões preferenciais para o escoamento, onde a resistência ao movimento da resina é menor, levando muitas vezes ao aparecimento de áreas por saturar com resina nas regiões mais interiores do meio poroso. Estas áreas são prejudiciais à qualidade global da peça, pois sem a acção aglomerante e consolidante da resina as peças defeituosas acabam por falhar aquando da sua utilização. É, pois, essencial fazer um prognóstico do escoamento de enchimento, através de métodos de ensaio, de modo a implementar medidas correctivas que evitem o aparecimento das zonas defeituosas. Os resultados experimentais relativamente a este tipo de escoamento são muito poucos e de dúbia qualidade, omitindo-se muitos aspectos importantes à compreensão dos estudos realizados (Han *et al.*, 1993). Assim sendo, e numa tentativa de clarificar essas dúvidas, pretende-se, com este trabalho, obter resultados relativos ao escoamento de um fluido através de um meio poroso de modo a simular a etapa do enchimento da cavidade moldante que ocorre durante o processo RTM.

1.3 Objectivos

O objectivo do presente trabalho consiste essencialmente em conceber, projectar, supervisionar e acompanhar a construção de uma instalação laboratorial para a simulação experimental do processo de enchimento de uma cavidade moldante parcialmente preenchida com um meio poroso.

Pretende-se visualizar e acompanhar o escoamento bidimensional de um fluido viscoso que vai ter lugar numa cavidade moldante em acrílico, de geometria simples, parcialmente preenchida com uma espuma de permeabilidade conhecida.

O fornecimento do fluido de trabalho deverá satisfazer a condição de velocidade constante à entrada.

A avaliação experimental do escoamento é realizada com recurso às imagens obtidas através de filmagens do decurso da experiência. Os resultados experimentais obtidos (perfis de enchimento) são tratados e comparados com resultados obtidos por simulação

numérica, permitindo assim aferir da qualidade global dos resultados fornecidos pelas ferramentas de simulação numérica.

No entanto, a disponibilização dos resultados experimentais é, só por si, um contributo relevante, dada a escassez de tais resultados perfeitamente documentados na literatura.

Capítulo 2

Processo RTM

2.1 Descrição do processo

Segundo dados da literatura, uma primeira variante do processo RTM foi usada no início dos anos 40, conhecida como método Marco. Este processo, baseado no uso de um mecanismo de vácuo simples, de modo a conduzir o processo de impregnação, foi usado pela marinha dos Estados Unidos no desenvolvimento de barcos de grande porte feitos a partir de plásticos reforçados com fibra de vidro (Rudd *et al.*, 1997).

O processo RTM consiste em dois estágios sequenciais, não isotérmicos: estágio de enchimento do molde e estágio de cura da resina.

O estágio de enchimento consiste na injeção de uma resina (que não é mais do que um pré-polímero) misturada com um agente de cura (que pode ainda conter um iniciador e/ou catalisador) para o interior de um molde pré-aquecido, criando um gradiente de pressão. Nesse molde, encontra-se um material fibroso seco cuja forma é determinada previamente, e daí a designação de fibra pré-forma.

Existem diferentes formas de fazer chegar a resina à cavidade moldante: (i) a resina e o agente de cura são transportados através de uma bomba até um misturador, onde as duas substâncias são misturadas, iniciando-se a fase de injeção (Figura 2.1 (a)); (ii) através de injeção directa, em que a resina pré-misturada com o agente de cura é bombeada directamente para o molde (Figura 2.1 (b)); ou (iii) um gás sob pressão, geralmente ar, é aplicado directamente sobre a resina pré-misturada contida no tanque de armazenamento (Figura 2.1 (c)) (Rudd *et al.*, 1997).

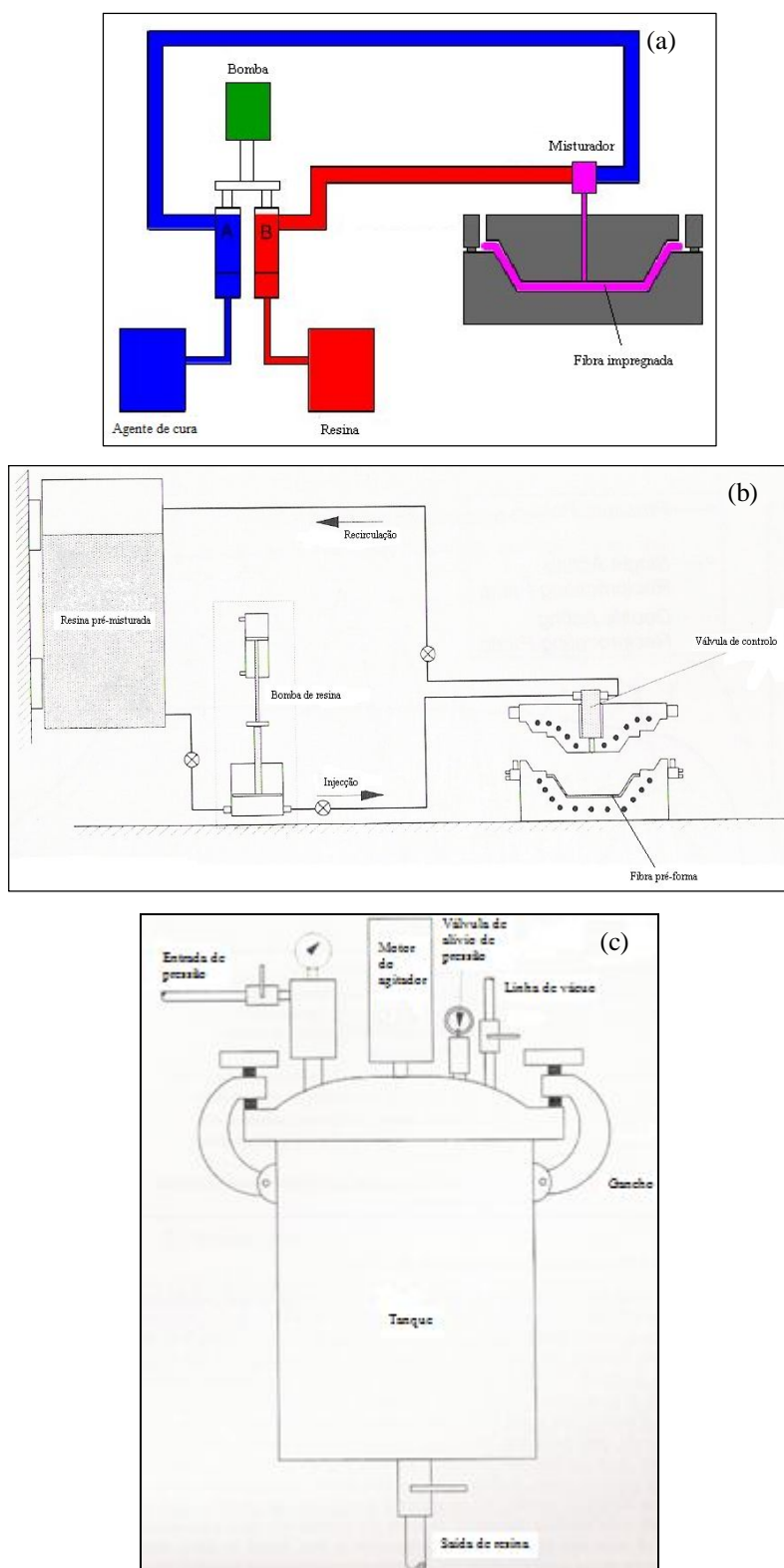


Figura 2.1 Esquematização de algumas formas de fazer chegar a resina à cavidade moldante durante o processo RTM, (a) a resina e o agente de cura são injectados após serem misturados, (b) injeção directa da resina pré-misturada com o agente de cura, (c) aplicação directa de um gás sob pressão sobre a resina pré-misturada (Rudd *et al.*, 1997).

Seguidamente, a resina impregna a fibra à medida que a sua frente de escoamento expelle o ar que ocupa os espaços vazios da fibra (lavagem da fibra).

Algumas estratégias de injeção de resina estão representadas na Figura 2.2.

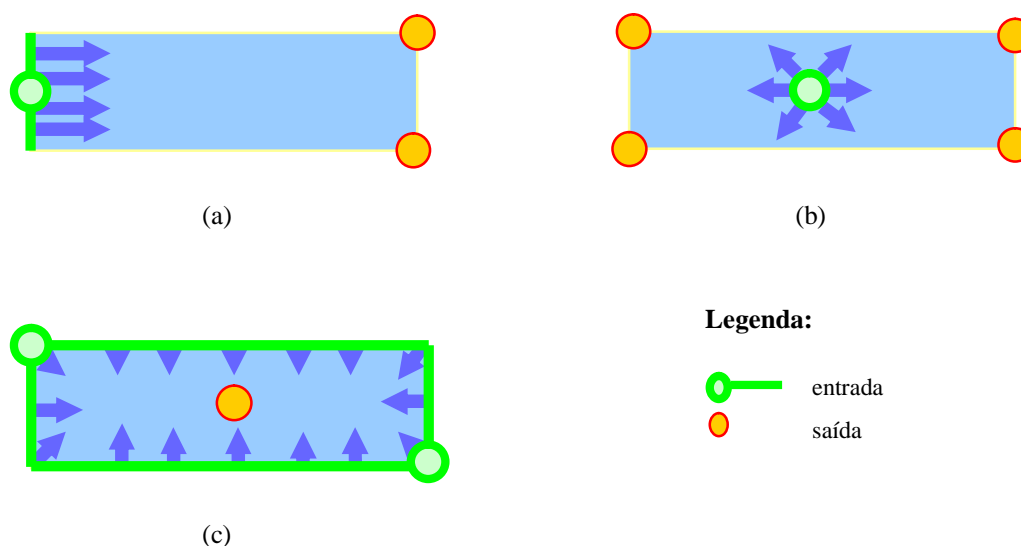


Figura 2.2 Estratégias de injeção de resina, (a) uniaxial (lento), (b) radial, (c) convergente (mais rápido) (Summerscales, 2007).

Deve-se ter especial cuidado para o reforço não se mover durante a etapa de injeção.

No estágio de cura a resina sofre uma reacção exotérmica (liberta calor), a qual é acompanhada de um aumento muito acentuado da sua viscosidade, sofrendo um processo de reticulação interna (Rudd *et al.*, 1997) e possibilitando, desta forma, a consolidação da peça. O processo de cura ocorre também durante o estágio de enchimento porque a temperatura e a conversão são governadas pela convecção do fluido (Rudd *et al.*, 1997). A reacção de cura da resina é desencadeada e levada até um estágio adiantado antes da remoção da peça do molde.

É importante analisar cuidadosamente as etapas de enchimento e cura uma vez que estão inter-relacionadas, e ambas têm efeitos dominantes na qualidade final da peça e no tempo de processamento.

O arrefecimento da peça final é efectuado dentro da cavidade moldante, até esta adquirir um determinado nível de rigidez, sendo retirada posteriormente para um outro local de temperatura controlada.

A Figura 2.3 ilustra esquematicamente o processo RTM.

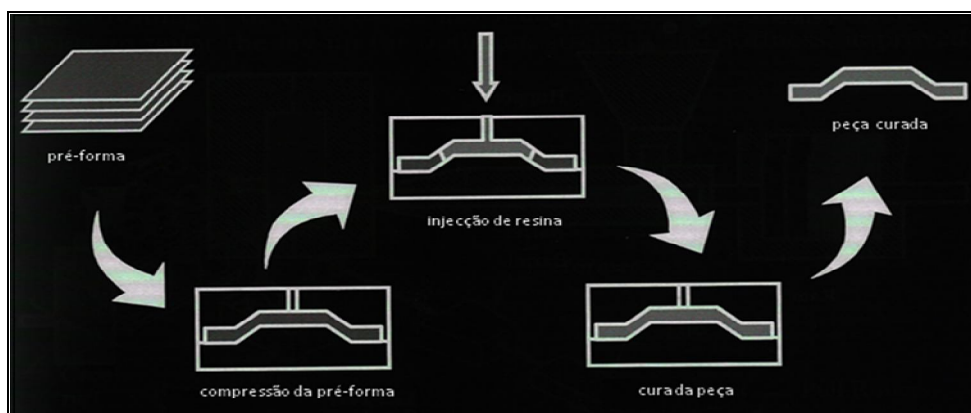


Figura 2.3 Esquematisação do processo RTM (Campbell, 2004).

A selecção do material de reforço apropriado e o modo de fabrico da pré-forma são baseados numa ponderação balanceada de vários critérios. Os principais factores levados em consideração são o nível requerido de propriedades mecânicas e as características do processo e, em particular, a sua permeabilidade.

As fibras comumente utilizadas neste processo de fabrico são fibras de vidro, de aramida e de carbono. As fibras de vidro são usadas extensivamente em aplicações comerciais, nomeadamente no sector automóvel, reunindo um bom equilíbrio das propriedades requeridas para este tipo de processo aliado a um baixo custo. As fibras de aramida, de natureza orgânica, possuem densidades baixas e um grau de dureza elevado. Embora dispendiosas, as fibras de carbono apresentam melhores propriedades mecânicas sendo, por isso, muito utilizadas em aplicações que exigem uma performance mais elevada (elevada resistência mecânica e baixo peso), como o fabrico de componentes para a indústria aeroespacial.

A matriz ou resina tem como principal função aumentar a resistência interlaminar em relação às forças de corte, proteger as fibras da abrasão e mantê-las na mesma posição.

As principais resinas usadas no processo RTM são polímeros termofixos (termorrígidos): resinas de poliéster insaturado, de epóxido e éster-vinílicas. Estas substâncias são geralmente acompanhadas de um agente de cura compatível, que é adicionado e misturado inicialmente à resina, formando um líquido de baixa viscosidade,

que cura devido ao calor gerado (reação exotérmica) ou ao calor aplicado externamente. Da reação de cura resulta uma série de ligações entre as cadeias moleculares, formando uma extensa rede molecular e dando origem a um sólido resistente que não pode ser reprocessado, mesmo quando reaquecido (Campbell, 2004). Estas resinas devem possuir as seguintes características (Rudd *et al.*, 1997):

- viscosidade suficientemente baixa e um período de tempo no estado de gel (transformação súbita e irreversível a partir da qual o líquido viscoso passa a um estado de gel com características elásticas) elevado, de modo a permitir uma impregnação completa das fibras;
- características favoráveis à cura, para que esta ocorra em ciclos de tempo admissíveis;
- propriedades mecânicas adequadas, após a cura.

A viscosidade de uma resina que ainda não sofreu o processo de cura pode ser descrita como a sua resistência ao escoamento. Quanto mais baixo for o valor da viscosidade da resina, maior é a facilidade de processamento e mais eficaz é a impregnação na fibra. A viscosidade típica das resinas termofixas é inferior a 10 Poise (Campbell, 2004).

Na Figura 2.4 encontra-se representado um histórico de temperatura típico de um ciclo RTM. Os acontecimentos característicos ocorridos durante o processo (injecção de resina, impregnação e cura) podem ser observados. O histórico de temperatura resultante é dependente de vários factores: da temperatura, da formulação da resina, do seu pré-aquecimento e capacidade calorífica, e da condutividade térmica do material de que é feito o molde. A título de exemplo, o histórico de temperatura no caso de moldes metálicos que possuem valores de condutividade térmica mais elevados, revela picos de temperatura (resultantes da reação exotérmica) mais baixos relativamente aos moldes feitos com outros materiais de condutividades térmicas mais baixas. Nestes, as variações de temperatura através do molde são mais elevadas (maiores gradientes térmicos internos).

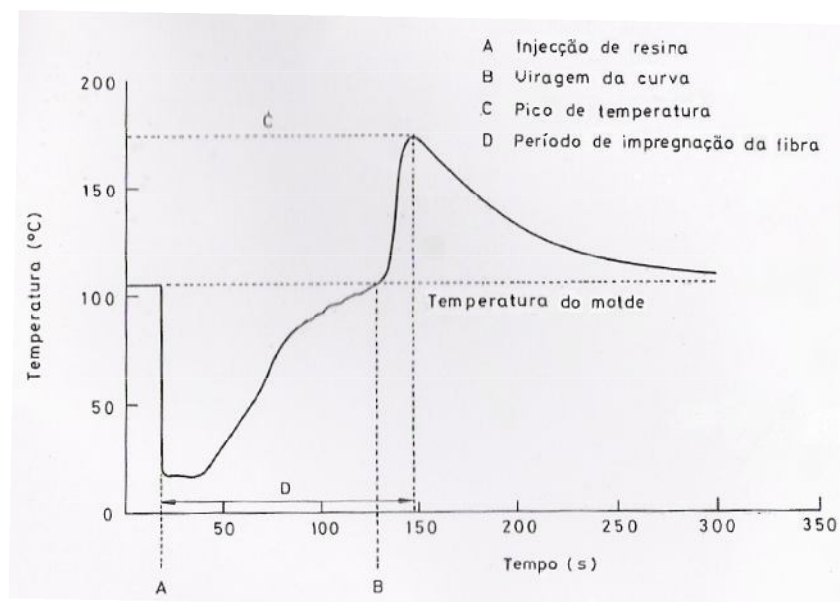


Figura 2.4 Histórico de temperatura típico de um ciclo RTM (Eckold, 1994).

O controlo do processo para aumentar a taxa de produção é um pouco complexo devido ao número de parâmetros inter-relacionados. Por exemplo, o pré-aquecimento da resina antes da fase de injeção pode reduzir o tempo de ciclo de enchimento, mas ao mesmo tempo requer uma redução da temperatura do molde para impedir uma cura prematura durante a fase de injeção da resina (Eckold, 1994).

2.2 Relevância do processo

O processo RTM é atractivo para o fabrico de materiais compósitos devido ao seu potencial na produção de peças com formas complexas e de dimensões precisas a um preço acessível, e a um melhor acabamento de superfície em relação a outros métodos (Freitas e Silva, 2007).

As pressões de injeção usadas são baixas, geralmente menos do que 7 bar (30 psi – 100 psi), o que permite o uso de moldes fabricados com materiais pouco exigentes e pouco dispendiosos.

Outras das vantagens encontradas, quando se recorre ao uso deste processo, são a possibilidade de automatização do processo, da incorporação directa de insertos devido à consolidação eficiente da peça, e a utilização de uma fracção volumétrica de fibras alta (até 65%) permitindo uma tensão de rotura à tracção e um módulo de elasticidade elevados (Freitas e Silva, 2007).

Uma vez que durante o processo o molde permanece fechado, as zonas laterais da peça ficam em contacto com as paredes do molde podendo ser revestidas com o fluido e as emissões voláteis são mínimas.

O processo RTM é um método versátil, permitindo uma taxa de produção de peças relativamente elevada (2-8 peças por hora) e ciclos de produção rápidos (Resin Transfer Molding, 2007).

As aplicações do processo RTM são inúmeras. A indústria automóvel é um dos sectores que mais recorre ao uso de componentes compósitos. Os painéis de revestimento de viaturas, sobretudo de linhas desportivas, requerem materiais leves e ao mesmo tempo resistentes.

Enquanto a aplicação de compósitos na indústria automóvel torna os veículos bastante dispendiosos, os requisitos ao nível da performance exigidos na concepção de aviões, tanto militares como civis, muitas vezes impõem o uso de compósitos para alcançar objectivos tão importantes como, por exemplo, a redução de peso. O processo RTM oferece muitas vantagens ao sector aeroespacial. Os custos envolvidos no fabrico dos componentes são relativamente baixos (comparando com a dimensão do custo global envolvido na concepção de um avião), o número de peças necessárias é reduzido (peças maiores e com estruturas mais complexas) e o peso total alcançado é bastante menor.

A indústria naval também utiliza actualmente peças compósitas para a construção dos cascos dos navios bem como de velas.

As aplicações RTM abrangem muitos outros sectores, tais como lazer, energia, desporto, e doméstico.



Figura 2.5 Alguns exemplos de áreas de aplicação do processo RTM (Freitas e Silva, 2007; Liquid Resin Molding, 2007; Conservatório Souza Lima, 2007).

2.3 Fenómeno “*race tracking*” e suas implicações

As fibras pré-formas utilizadas no processo RTM (e LCM, em geral) apresentam muitas vezes deformações ao nível da sua estrutura física (devido, por exemplo, a um corte deficiente do meio poroso) provocando variações locais nas suas propriedades. Para além disso, no interior da cavidade do molde podem existir pequenas folgas (“*gaps*”) entre a fibra pré-forma e a parede do molde devido a um ajuste deficiente do meio poroso ao interior da cavidade moldante, a deslocamentos do meio poroso, ao tamanho desajustado da fibra ou simplesmente devido a deformações desta. Estas situações são responsáveis pela existência de zonas de escoamento preferencial por parte do fluido de injeção, originando um escoamento multi-regional. Na génese deste tipo de escoamento não uniforme está o fenómeno “*race tracking*”, também chamado “*edge effect*” ou “*channeling effect*” (Ni *et al.*, 1996).

O fenómeno “*race tracking*” é, portanto, descrito como o efeito devido à passagem do fluido, por exemplo, por zonas na fibra com diferentes permeabilidades, por canais desobstruídos ou zonas danificadas, podendo alterar variáveis processuais como a pressão de entrada e de enchimento. Nas zonas livres de fibra, bem como nas áreas da fibra em que a permeabilidade é alta, a resistência ao escoamento é menor dando origem a diferentes perfis de velocidade. A presença do fenómeno “*race tracking*”, por sua vez, é a principal

responsável pela ocorrência de outros acontecimentos, nomeadamente a formação de “*dry spots*”.

Um “*dry spot*” (ou ponto seco) é uma área na fibra pré-forma que não foi saturada com resina durante a fase de enchimento, e representa um dos defeitos menos desejados no fabrico de compósitos poliméricos. Para além do “*race tracking*” também uma localização inapropriada dos “*inlets*” (entradas no molde) e/ou “*outlets*” (saídas do molde) pode contribuir para o aparecimento destas formações, mesmo que a permeabilidade da fibra seja uniforme (Han *et al.*, 1993). Segundo experiências realizadas por Han, Wu e Lee (Han *et al.*, 1993) em RTM, uma forma de ultrapassar a formação destas manchas consistiu em fechar a saída do molde utilizado para forçar o fluido de preenchimento a escoar para a zona “*dry spot*”. A velocidade da linha da frente do escoamento vai decrescendo gradualmente devido ao aumento da pressão de ar na zona “*dry spot*”. O escoamento cessa devido ao equilíbrio alcançado entre as pressões no fluido e no “*dry spot*”. Nesta altura, o fluido começa a penetrar a zona da fibra correspondente à mancha devido a pressões capilares (diferença de pressão através da interface que separa dois fluidos em contacto e contidos numa estrutura porosa).

2.4 Modelação matemática do processo

O estudo do escoamento de uma resina durante a fase de enchimento de uma cavidade moldante tem sido realizado recorrendo sobretudo a simulação numérica.

Para além da técnica LCM, utilizada no fabrico de materiais compósitos, são muitas as situações práticas que envolvem escoamentos de fluidos em domínios abertos conjugados com meios porosos. O prognóstico numérico destes escoamentos requer uma modelação matemática apropriada do problema físico em causa englobando a totalidade do domínio (livre e poroso) (Costa *et al.*, 2004).

O escoamento no meio livre é modelado através das equações de Navier-Stokes. Estas equações resultam do balanço de forças que actuam no elemento de fluido.

A Lei de Darcy é uma das primeiras aproximações bem sucedidas utilizadas para a modelação matemática de escoamentos em meios porosos (o escoamento do fluido através do reforço fibroso pode ser considerado como um fluxo através de um meio poroso).

Contudo, a sua aplicação é limitada. Os resultados não são satisfatórios quando comparados com dados experimentais. Vários estudos detectaram inconsistências na sua utilização, especialmente ao nível da interface entre os domínios livre e poroso, pelo facto de não considerar efeitos de inércia, gravidade e de viscosidade. Além disso, no tratamento matemático da interface surge uma discrepância na ordem da equação de Darcy em relação às equações de Navier-Stokes. Desta forma, quando se recorre ao modelo de Darcy é necessário usar uma lei de escorregamento na interface entre o meio poroso e o meio livre de modo a compatibilizar aquele modelo com as equações de Navier-Stokes (Costa *et al.*, 2004).

A necessidade de “vencer” todas as restrições ao uso da Lei de Darcy tem conduzido ao desenvolvimento de modelos mais completos, dos quais o de Brinkman-Forchheimer é geralmente aceite como a melhor aproximação para lidar com as limitações da equação de Darcy em escoamentos através de meios porosos. Com a modificação Forchheimer os efeitos de inércia são tomados em consideração enquanto que, com a introdução do termo de Brinkman, as equações diferenciais que governam o escoamento do fluido no interior do meio poroso tornam-se da mesma ordem das equações de Navier-Stokes que regem o escoamento do fluido no domínio aberto (Costa *et al.*, 2004). O modelo de Brinkman-Forchheimer não é mais do que uma generalização da lei Darcy.

2.4.1 Estágio de enchimento

➤ Domínio livre

O escoamento **bidimensional** de um fluido Newtoniano (no presente caso, a mistura da resina com o agente de cura), em regime laminar num domínio aberto é governado pelas equações da continuidade e de Navier-Stokes que, usando a **notação indicial** ($i, j = 1, 2$) são, respectivamente, (Costa *et al.*, 2004; Costa, 2004),

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\mu \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) + \rho g_j \quad (2)$$

onde a expressão $\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j)$ representa o termo transitório, a expressão $\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j)$ representa o termo da convecção do fluido, $-\frac{\partial p}{\partial x_j}$ é o termo da queda de pressão, $\frac{\partial}{\partial x_i}(\mu \frac{\partial u_j}{\partial x_i})$ é o termo dos efeitos viscosos e ρg_j representa o termo da acção da gravidade. $u_j (j=1,2)$ são as componentes da velocidade, t é a variável tempo, p é a pressão, μ é a viscosidade dinâmica do fluido, g é a aceleração da gravidade e ρ é a massa volúmica do fluido.

Se ocorrer transferência de calor (escoamento não isotérmico), a equação de conservação de energia térmica é (Costa *et al.*, 2004),

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i C_p T) = \frac{\partial}{\partial x_i}(k \frac{\partial T}{\partial x_i}) + \dot{q}_g \quad (3)$$

onde $\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T)$ é o termo da acumulação, $\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i C_p T)$ é o termo convectivo, $\frac{\partial}{\partial x_i}(k \frac{\partial T}{\partial x_i})$ é o termo condutivo e \dot{q}_g é o termo correspondente à geração volumétrica de calor. C_p é a capacidade calorífica do fluido, T é a temperatura, e k é a condutividade térmica.

➤ Domínio poroso

As equações matemáticas geralmente utilizadas para modelar o escoamento **bidimensional** de um fluido Newtoniano num meio poroso, em regime laminar e assumindo um estado de isotropia, são as equações de conservação da massa (ou

continuidade) semelhantes na forma à equação (1) e as equações Brinkman-Forchheimer que podem ser escritas da seguinte forma (Costa, 2004),

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \frac{u_j}{\epsilon}) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\frac{\mu_B}{\epsilon} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) - (F \epsilon \frac{\rho}{\sqrt{K}} |\vec{V}| + \frac{\mu}{K}) u_j + \rho g_j \quad (4)$$

onde $\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon u_j)$ representa o termo transitório, $\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \frac{u_j}{\epsilon})$ é o termo convectivo, $-\frac{\partial p}{\partial x_j}$ é o termo relativo à pressão, $\frac{\partial}{\partial x_i}(\frac{\mu_B}{\epsilon} \frac{\partial u_j}{\partial x_i})$ é o termo difusivo viscoso, $(F \epsilon \frac{\rho}{\sqrt{K}} |\vec{V}| + \frac{\mu}{K}) u_j$ é a combinação dos termos inercial e viscoso e ρg_j é o termo da acção da gravidade. ϵ é a porosidade do meio poroso, K é a permeabilidade do meio poroso, μ_B é a viscosidade de Brinkman ou efectiva (modificação de Brinkman), F é o coeficiente Forchheimer, e $|\vec{V}|$ é o módulo do vector velocidade.

As equações de Brinkman-Forchheimer são uma generalização da lei de Darcy padrão. Assim, quando os efeitos de inércia são negligenciáveis, em regime permanente aquelas equações reduzem-se à lei de Darcy,

$$\frac{\partial p}{\partial x_j} = -\frac{\mu}{K} u_j \quad (5)$$

Considerando escoamento unidireccional (as velocidades do fluido nas direcções y e z são zero) a lei de Darcy é reduzida à seguinte expressão,

$$u_x = -\frac{K}{\mu} \frac{dP}{dx} \quad (6)$$

No entanto, existe um critério que permite avaliar se os efeitos de inércia podem ou não ser negligenciáveis através do número de Reynolds baseado na permeabilidade do meio poroso, K ,

$$Re_k = \frac{\sqrt{K} \rho |V|}{\mu} \quad (7)$$

Assim, quando $Re_k \geq 1$ os termos de inércia devem ser tidos em conta e a lei de Darcy não é válida e vice-versa.

Muitas das vezes, de modo a simplificar a modelação matemática do processo, considera-se a existência de um escoamento isotérmico. Mas, na realidade, durante a fase de enchimento ocorre transferência de calor, pelo que deve ser considerada uma análise térmica do escoamento. Para além da injeção de resina aquecida, geralmente o molde também é aquecido para promover um escoamento e ciclos de cura mais rápidos, ocorrendo transferência de calor entre as paredes do molde, o reforço e a resina.

Assim, um balanço térmico à resina contida no meio poroso pode ser descrito pela equação,

$$\varepsilon \rho_r C_{p_r} \frac{\partial T_r}{\partial t} + \rho_r C_{p_r} \vec{V} \cdot \nabla T_r = \varepsilon \nabla \cdot (k_r \nabla T_r) + a_v h_v (T_f - T_r) + \varepsilon \Phi + \varepsilon \dot{G} \quad (8)$$

onde $\varepsilon \rho_r C_{p_r} \frac{\partial T_r}{\partial t}$ representa a variação da energia interna da resina, $\rho_r C_{p_r} \vec{V} \cdot \nabla T_r$ representa a contribuição devido ao fenómeno da convecção, $\varepsilon \nabla \cdot (k_r \nabla T_r)$ representa o fenómeno da condução e $a_v h_v (T_f - T_r)$ diz respeito à transferência de calor entre a fibra e a resina. ρ , C_p , k são a massa volúmica, o calor específico e a condutividade térmica da resina, respectivamente. h_v é o coeficiente de transferência de calor por convecção entre a fibra e a resina, a_v é a área superficial do meio poroso por unidade de volume e T é a temperatura. Os índices r e f querem significar os termos resina e fibra, respectivamente. Φ é a taxa de dissipação viscosa que provém do calor gerado pelo escoamento da resina através do meio poroso. \dot{G} é o calor gerado pela reacção de cura da resina por unidade de volume, e é expresso como,

$$\dot{G} = \Delta h \cdot \dot{m} \quad (9)$$

onde $\dot{m} = \frac{d\alpha}{dt}$ é a taxa de cura da resina (ou velocidade de reacção) e α é o grau de cura da resina.

O balanço térmico à fibra porosa (semelhante ao da resina mas sem os termos da convecção, reacção e da dissipação viscosa) é descrito pela seguinte equação,

$$(1 - \varepsilon) \rho_f C_{p_f} \frac{\partial T_f}{\partial t} = (1 - \varepsilon) \nabla \cdot (k_f \nabla T_f) + a_v h_v (T_r - T_f) \quad (10)$$

Quando a velocidade do fluxo de resina é baixa, o termo de dissipação viscosa é desprezável e é válido assumir que há equilíbrio térmico local entre a resina e a fibra (Shojaei *et al*, 2004). Desta forma, após simplificação, a expressão que traduz a ocorrência de transferência de calor no meio fibroso que está a ser impregnado com o fluido é dada pela equação resultante da soma das Equações (8) e (10):

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_r C_{p_r} \vec{V} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + \varepsilon \dot{G} \quad (11)$$

sendo $\rho C_p = \varepsilon \rho_r C_{p_r} + (1 - \varepsilon) \rho_f C_{p_f}$ e $k = \varepsilon k_r + (1 - \varepsilon) k_f$.

Tendo em conta que o objectivo fulcral do presente trabalho é estudar o escoamento apenas durante o estágio de enchimento do processo RTM sem o envolvimento de quaisquer trocas de calor, as equações (3), (8), (9), (10) e (11), respeitantes ao escoamento não isotérmico, não vão ser consideradas.

➤ Tratamento da interface

É assumido que na zona da interface não ocorrem fenómenos de mudança de fase, nem reacções químicas, e prevalece o equilíbrio térmico local.

A lei da conservação da massa em cada ponto da interface implica que,

$$(\rho \vec{V} \cdot \vec{n})_{dl} = (\rho \vec{V} \cdot \vec{n})_{dp} \quad (12)$$

onde os subscritos dl e dp significam, respectivamente, domínio livre e domínio poroso e \vec{n} é um vector unitário normal à interface no ponto da interface sob análise.

O princípio da continuidade da tensão normal é dado por,

$$(\vec{n} \cdot \vec{n} \cdot \vec{\sigma})_{dl} = (\vec{n} \cdot \vec{n} \cdot \vec{\sigma})_{dp} \quad (13)$$

e o da tensão de corte (tangencial) na interface por,

$$(\vec{t} \cdot \vec{t} \cdot \vec{\sigma})_{dl} = (\vec{t} \cdot \vec{t} \cdot \vec{\sigma})_{dp} \quad (14)$$

onde \vec{t} é um vector unitário tangente à interface.

A tensão total, σ_{ij} , é dada pela expressão,

$$\sigma_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - p \delta_{ij} \quad (15)$$

onde μ é substituído por μ_B no meio poroso. δ_{ij} é a função δ de Kronecker. É assumido também que a pressão é contínua através da interface,

$$(p)_{dl} = (p)_{dp} \quad (16)$$

A condição de continuidade da velocidade na interface é também imposta,

$$(\vec{V})_{dl} = (\vec{V})_{dp} \quad (17)$$

Quando a transferência de calor está presente, a condição de equilíbrio térmico local e um balanço de energia na interface dá origem às seguintes condições:

$$(T)_{dl} = (T)_{dp} \quad (18)$$

$$(\vec{n} \cdot \vec{q})_{dl} = (\vec{n} \cdot \vec{q})_{dp} \quad (19)$$

onde $q_i = \rho u_i C_p (T - T_0) - k \frac{\partial T}{\partial x_i}$ é o fluxo de calor.

Quando a lei de Darcy é válida, é necessário utilizar uma lei de escorregamento na zona da interface expressa por uma força tangencial,

$$(\vec{t} \cdot \vec{t} \cdot \vec{\sigma})_{dl} = \frac{a}{\sqrt{K}} [(\vec{t} \cdot \vec{V})_{dl} - (\vec{t} \cdot \vec{V})_{dp}] \quad (20)$$

onde a é um parâmetro adimensional dependente das características do meio poroso.

2.4.1.1 Modelação numérica

O método comumente usado para a predição de escoamentos laminares bi-dimensionais em domínios de geometria complexa é o “*Control Volume/Finite Element Method*” (CV/FEM). Esta técnica é baseada numa malha fixa para representar o domínio preenchido pelo fluido e que resulta de uma combinação entre os métodos “*Finite Element*” (FE) e “*Control Volume*” (CV).

Primariamente o domínio de cálculo é discretizado em elementos finitos, geralmente na forma de triângulos ou de quadriláteros. Os nodos da malha composta pelos elementos poligonais (elementos finitos) correspondem aos vértices desses polígonos. Posteriormente, cada elemento é subdividido por linhas que ligam o centróide ao ponto médio de cada lado. Um volume de controlo é composto por várias subáreas circundando um nodo único, como se pode observar na Figura 2.6.

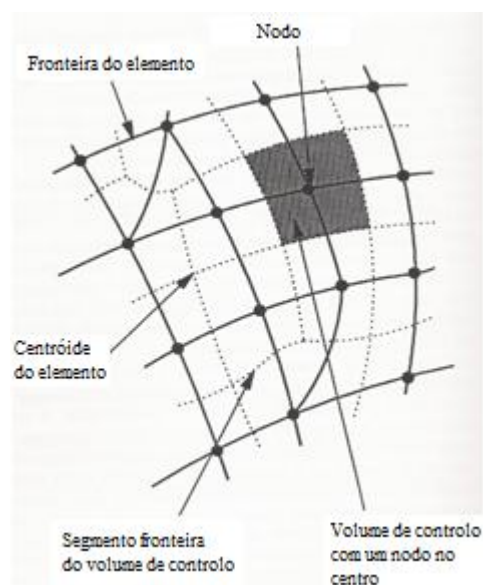


Figura 2.6 Subdivisão da malha FE em volumes de controle (Rudd *et al.*, 1997).

As propriedades termofísicas são armazenadas no centróide de cada elemento e assumidas para prevalecer sobre ele. Todas as variáveis dependentes são armazenadas nos mesmos nodos da malha. As equações dos domínios livre e poroso são integradas sobre cada volume de controle. Desta forma, cada uma das equações integro-diferenciais é aproximada por uma equação algébrica ou de discretização que relaciona as variáveis dependentes de cada nodo aos nodos imediatamente vizinhos (Costa *et al.*, 2004).

Cada volume de controle tem associado um factor de enchimento f , ou fracção volúmica, que representa o grau de saturação da resina da região (igual ao volume de resina dividido pelo volume de poros do volume de controle). Desta forma, um f igual a zero significa um volume de controle preenchido com ar enquanto que um f igual à unidade significa uma região completamente saturada com resina. Um valor de f intermédio indica que a frente do fluxo passa pelo volume de controle em questão, como é demonstrado na Figura 2.7 e em que o volume de controle está parcialmente preenchido com ar e parcialmente preenchido com resina.

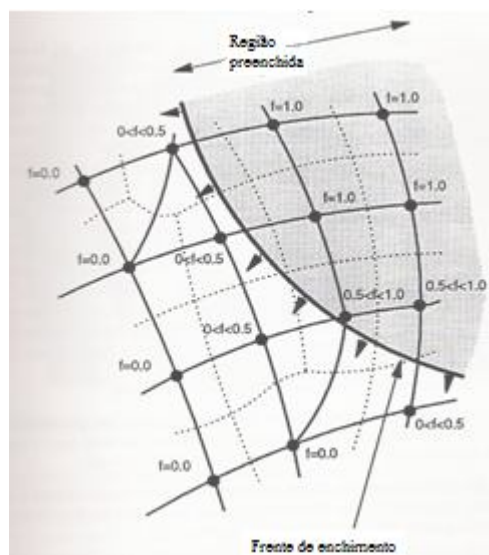


Figura 2.7 Factores de enchimento para modelo parcialmente preenchido (Rudd *et al.*, 1997).

A nova posição da frente de escoamento é então calculada através da actualização dos factores de enchimento para elementos adjacentes ao domínio saturado.

O caudal total de escoamento é avaliado sobre cada fronteira do volume de controlo e, através da escolha apropriada de um incremento de tempo, pode ser calculado o volume de resina que flui em cada volume de controlo adjacente à frente de escoamento (Rudd *et al.*, 1997).

2.4.2 Estágio de cura

O estágio de cura é mais lento que o processo de enchimento, e pode admitir-se que se inicia só quando o molde já está preenchido com a resina. Nesta etapa, os termos referentes à convecção são removidos das equações de balanço energético e mássico que caracterizam o estágio de preenchimento.

As equações empíricas de velocidade de reacção de cura, embora expressões menos elegantes do ponto de vista químico, são uma forma mais geral, simples e rápida de calcular a velocidade de cura e são aplicáveis a uma vasta gama de resinas e químicas de reacção (Rudd *et al.*, 1997).

O modelo cinético empírico proposto por *Kamal e Sourour* é a expressão mais utilizada para descrever a cinética de cura de sistemas de resina utilizados no fabrico de compósitos, e é dada por (Jang, 1994; Shojaei *et al.*, 2004),

$$\dot{m} = (K_1 + K_2 \alpha^{m_1})(1 - \alpha)^{m_2} \quad (21)$$

sendo $K_1 = A_1 e^{-E_1/(RT)}$, $K_2 = A_2 e^{-E_2/(RT)}$.

K_1 e K_2 são constantes cinéticas dependentes da temperatura, E_1 e E_2 são energias de activação, m_1 e m_2 são as ordens da reacção (constantes da equação cinética), A_1 e A_2 são factores pré-exponenciais, T é a temperatura absoluta e R a constante Universal dos gases.

A viscosidade da resina sofre uma grande alteração com a reacção de cura, a que corresponde o processo de consolidação da resina. Assim, esta propriedade, para além de ser uma medida da resistência da resina ao escoamento, é uma indicação do grau de cura no processo RTM, que pode ser descrita por um modelo empírico do tipo Arrhenius (Lee e Wei, 1999),

$$\mu(T, \alpha) = \mu_0 \cdot e^{\left(\frac{E_U}{RT} + z\alpha\right)} \quad (22)$$

Neste modelo, a viscosidade, μ , é uma função da temperatura e do grau de cura da resina. Os parâmetros μ_0 , E_U e z são constantes do modelo, para cada tipo de resina.

2.4.3 Variáveis do processo

O conhecimento geral das variáveis envolvidas no processo RTM e, em particular, um conhecimento prévio do escoamento durante a fase de injeção da resina e a distribuição da pressão do fluido permitirão o projecto de um molde com maior eficácia e consequentemente a obtenção de peças com maior qualidade.

Os parâmetros chave do processo RTM são, basicamente, as variáveis de processo usadas na lei de Darcy: as pressões de entrada e de saída, a permeabilidade e porosidade da fibra pré-forma, a viscosidade da resina, a forma do molde e o caudal de entrada de fluido ou a velocidade de entrada da resina (Wu e Jia, 2006).

Outras das variáveis de processo, não menos importantes, também comuns à maioria dos processos LCM, são a resistência do molde (que varia com o tipo de construção), as características térmicas do molde (em particular os materiais de que o molde é feito e a proximidade dos circuitos de aquecimento), a localização e o projecto da(s) porta(s) de injeção e da(s) saída(s) de ar, a reactividade do sistema de resina e a sua relação viscosidade-temperatura, e a porosidade da fibra (Rudd *et al.*, 1997).

A escolha da posição e a concepção da(s) porta(s) de injeção bem como de saída são talvez as variáveis mais importantes no projecto de construção do molde, na medida em que influenciam o ciclo de tempo do processo e determinam se a peça pode ser obtida sem defeitos. A sua concepção influencia também, significativamente, o historial da pressão no interior do molde.

Uma destas duas variáveis, pressão de injeção e/ou caudal (ou velocidade de entrada), são muitas vezes consideradas valores constantes durante o decorrer do processo de enchimento do molde.

A viscosidade é uma das propriedades fundamentais das resinas, correspondente ao transporte microscópico de quantidade de movimento por difusão molecular. Quanto maior a viscosidade, menor a velocidade de movimentação do fluido para uma mesma pressão de injeção. Assim, o grau de avanço da frente de escoamento é inversamente proporcional à viscosidade da resina como se pode observar pela equação de Darcy (Equação (6)).

Capítulo 3

Metodologia experimental

3.1 Descrição da instalação experimental

O presente trabalho consiste na construção de uma instalação laboratorial que inclui um molde parcialmente preenchido com um meio poroso, e que servirá para estudar o comportamento de um fluido viscoso ao escoar no interior desse molde. Desta forma, é possível simular experimentalmente a etapa de enchimento constituinte do processo RTM a partir do conhecimento prévio dos parâmetros e de algumas variáveis envolvidos no sistema, permitindo reproduzir os resultados de uma forma fidedigna e segura.

O molde ou célula, em vidro acrílico incolor, que contém dois canais (desobstruídos do meio poroso) uniformes paralelos à direcção principal do escoamento entre o meio poroso e as paredes da célula, recebe o fluido proveniente de um reservatório através de um sistema de bombagem. A presença daquelas zonas livres de meio poroso tem como finalidade o estudo do fenómeno “*race-tracking*” descrito em 2.3. A estratégia de injeção utilizada é a uniaxial (ver Figura 2.2 (a)), com velocidade constante à entrada.

O fluido utilizado é um óleo, ao invés de uma resina, uma vez que o intuito primordial deste projecto é simular o escoamento que ocorre num processo RTM e analisar o seu comportamento durante o estágio de enchimento e não a reacção de cura da resina. A utilização de um sistema de resina comum em RTM só iria prejudicar o estudo pretendido na medida em que a resina consolidaria e dificultaria a reutilização da instalação experimental.

Para o acompanhamento do movimento do fluido é utilizado um sistema de vídeo. As imagens obtidas serão objecto de estudo posterior.

Seguidamente, identifica-se e caracteriza-se em pormenor todo o equipamento que foi concebido, projectado e adquirido para a construção da montagem experimental.

➤ *Molde em vidro acrílico incolor*

Após a aquisição de três placas em metacrilato de metilo (vidro acrílico), cada uma com dimensões $(0,01\text{ m}) \times (0,45\text{ m}) \times (1\text{ m})$, procedeu-se ao processo de construção do molde numa pequena empresa prestadora de serviços de mecânica de precisão. O molde é constituído por três placas. Duas delas (uma no topo e outra na base) possuem numa das suas faces depressões longitudinais para a colocação de o-rings de vedação. A terceira placa, a intermédia, possui depressões em ambas as faces e apresenta um recorte hexagonal no centro correspondente à cavidade moldante. As três placas sobrepostas e apertadas entre si apresentam uma configuração tipo “sanduíche”. O motivo da colocação de o-rings prende-se com a intenção de vedar o molde para prevenir eventuais fugas do fluido. Esta configuração tem dimensões $(0,75\text{ m}) \times (0,27\text{ m}) \times (0,03\text{ m})$. A dimensão da cavidade útil onde irá ser colocado o meio poroso é de $(0,4\text{ m}) \times (0,15\text{ m}) \times (0,01\text{ m})$.

Os desenhos técnicos ilustrativos das peças que constituem a célula acrílica encontram-se no Apêndice A.1. A Figura 3.1 mostra a foto do molde resultante.

Nas zonas da entrada e saída do molde foram apertadas, à placa mediana, estruturas metálicas para apoiar a ligação dos terminais das condutas ao acrílico. Entre as estruturas metálicas e os terminais das condutas colocou-se tela de vedação em borracha para evitar fugas de óleo.

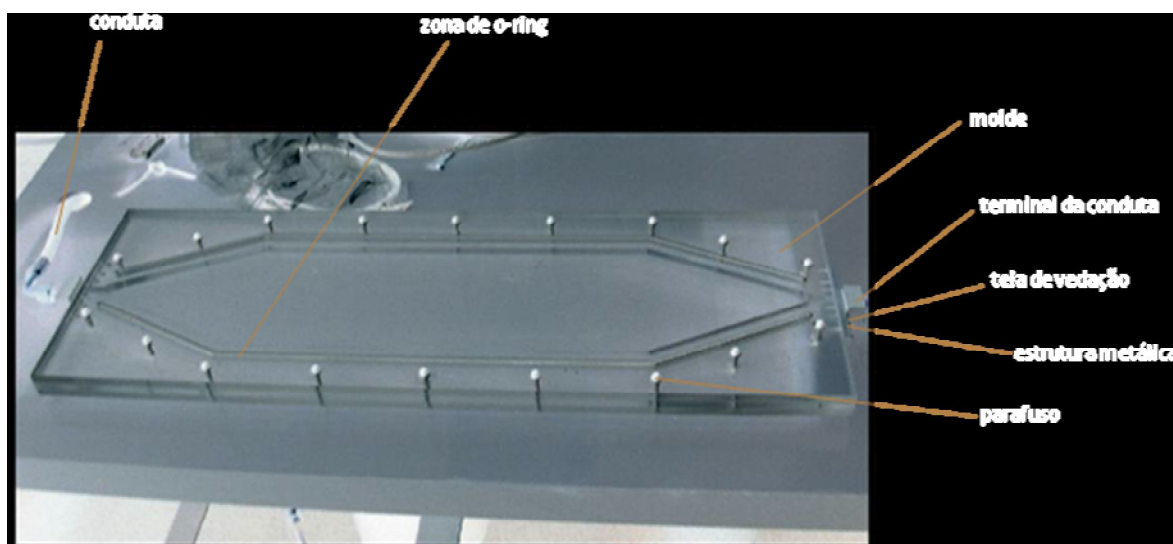


Figura 3.1 Molde em vidro acrílico incolor.

➤ *Meio poroso*

Foram estudados dois tipos de espumas: à base de poliéster e em poliuretano. O tipo de espuma à base de poliéster inclui diferentes graus de abertura: 30 ppi (*pores per inch*), 20 ppi e 15 ppi. O grau de abertura é inversamente proporcional ao número de ppi.

As propriedades físicas (possíveis de obter através dos fornecedores) de cada tipo de espuma encontram-se compiladas na tabela 3.1.

As diversas espumas vão ser submetidas a testes de permeabilidade, sujeitando-as a compressão de modo a ficarem com uma espessura igual à espessura interior do molde, como será relatado mais tarde no item 3.3. A sua porosidade será também determinada experimentalmente.

Após diversos testes, são escolhidas as que mais se assemelham (em termos de características) aos meios porosos comumente utilizados em processos RTM. Pretende-se um meio poroso que garanta um rigor geométrico na interface entre o fluido e o meio poroso, e que possua um valor de permeabilidade próximo dos valores de permeabilidade dos meios fibrosos usados em RTM.

Tabela 3.1 Propriedades físicas de cada tipo de espuma utilizado como meio poroso.

	espuma à base de poliéster	espuma em poliuretano
Cor	cinzenta	laranja
Massa volúmica (kg/m³)	30	23
Grupo químico característico	$R - COO - R'$	$R - NH - COO - R'$

➤ *Óleo utilizado*

O fluido escolhido para efectuar os trabalhos experimentais foi o óleo lubrificante Shell Tellus 68, uma mistura de óleos minerais altamente refinados, derivados de petróleo e outros aditivos, que apresenta uma viscosidade de 0,194 kg/(m.s) (1,94 Poise), à

temperatura de 20 °C. A escolha deste óleo em particular como fluido de escoamento deve-se ao facto deste ter propriedades físicas (ρ e μ) idênticas às da mistura resina mais agente de cura usuais em RTM.

A ficha técnica do óleo encontra-se no Apêndice A.2.

➤ *Mini-central*

A mini-central necessária para transportar o fluido até à cavidade moldante é constituída pelo seguinte equipamento:

- 1 depósito de 8 litros
- 1 motor eléctrico de 0.37 kW 1500 rpm B14
- 1 luneta e acoplamento motor/bomba
- 1 bomba hidráulica de engrenagens Siemens AP100/3,5 S409
- 1 filtro de aspiração
- 1 filtro de ar
- 1 bloco com válvula de segurança
- 1 regulador de caudal de 2 vias compensado em pressão
- 2 acoplamentos rápidos 1/4"
- 2 passadores de 2 vias 1/4"
- 1 válvula 2 vias 3/8"
- 1 manómetro DN 63 160 Bar
- acessórios diversos

➤ *Bancada metálica*

A bancada metálica (ver Figura 3.2), com dimensões (1,2 m) \times (0,8 m) \times (0,9 m), é a estrutura que suporta o molde e todos os acessórios anexos ao sistema óleo-hidráulico. Possui dois recortes circulares em duas das extremidades do tampo para que a ligação das tubagens ao molde seja facilitada.

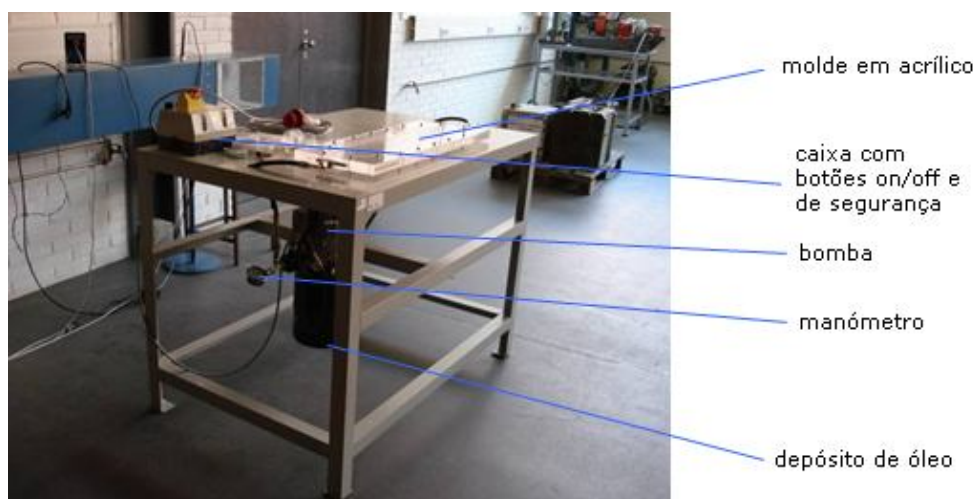


Figura 3.2 Bancada metálica.

3.2 Operação da instalação experimental

A instalação experimental foi projectada de modo a que o óleo que se encontra no depósito, forçado por uma bomba de engrenagens, flua até à cavidade moldante.

O caudal de óleo debitado pela bomba é restringido por uma válvula reguladora de caudal, compensada em pressão. Depois de fixar um determinado valor de pressão máximo no limitador de pressão, para segurança da instalação, o caudal de óleo desejado é regulado através de uma válvula reguladora de caudal (que atinge o valor mais elevado para o valor de pressão máximo).

É na cavidade moldante onde estão centradas todas as atenções, pois é nela onde vai ocorrer o estudo do escoamento de enchimento do domínio misto, através da visualização e filmagem desse mesmo escoamento, para posteriormente efectuar o tratamento das imagens adquiridas.

O óleo que sai da cavidade moldante é expelido para o exterior (pressão atmosférica, P_{atm}) e recebido num recipiente colector. Inicialmente, a instalação foi projectada para funcionar em circuito fechado, mas após o teste de vedação ao molde (relatado no Capítulo 4), optou-se pelo modo de circuito aberto. Desta forma, a pressão exercida no interior do molde não é tão elevada e o ar contido no interior da cavidade pode ser expulso livremente para a atmosfera à medida que o fluido vai avançando.

A bomba possui um manípulo que permite que o fluido seja purgado, mas apenas funciona quando o óleo flui em circuito fechado. Significa que, daquele modo, ao accionar a bomba o fluido sai directamente do depósito em direcção ao molde, preenche o molde, sai deste e antes de retornar ao depósito passa pela zona de purga. A esquematização da montagem está representada na Figura 3.3.

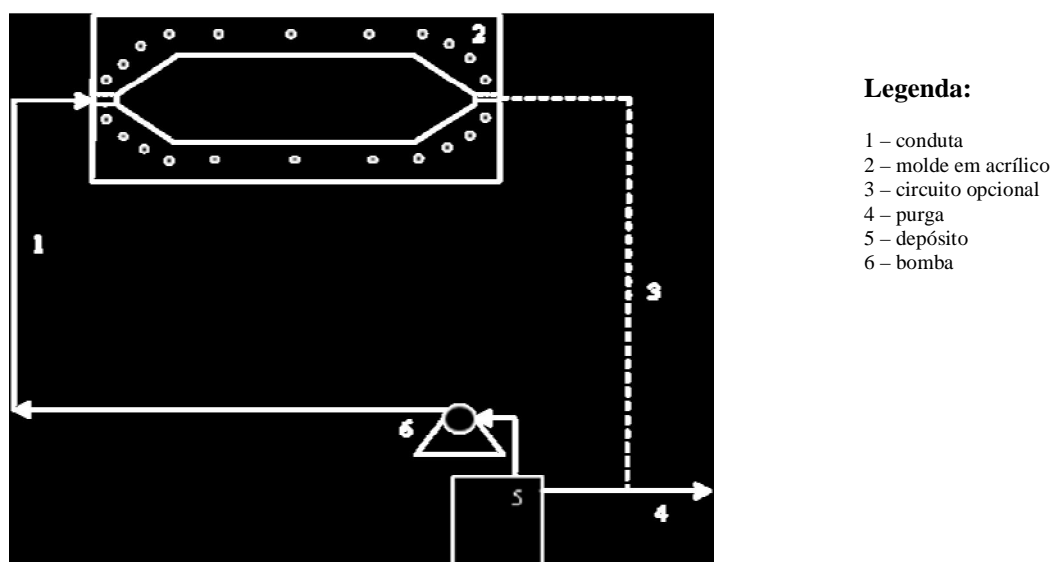


Figura 3.3 Esquematização simplificada da montagem experimental.

O caudal máximo operado pela bomba é de $5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ (3l/min).

O sistema hidráulico (sem a peça do molde) admite pressões na ordem das centenas de bar. A cavidade moldante é uma estrutura frágil devido ao material de que é feita (vidro acrílico), não suportando pressões muito elevadas.

Para ter uma ideia do quão grande é o valor da força exercida no interior do molde, considere-se um corte longitudinal sobre a área útil da estrutura moldante esquematizado na Figura 3.4

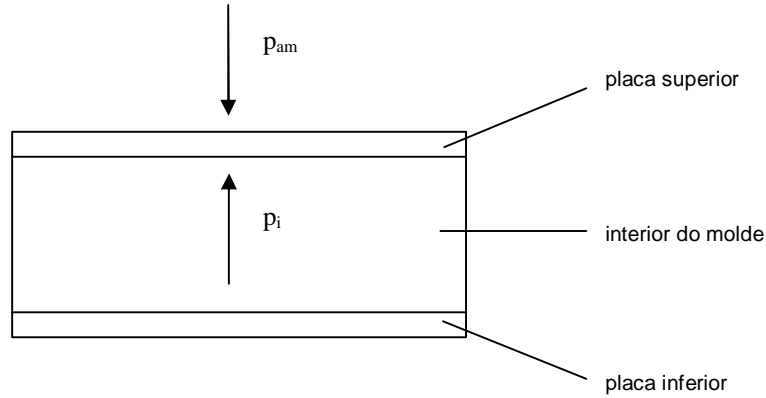


Figura 3.4 Esquematização de um corte longitudinal sobre a área útil da cavidade moldante.

Por definição, a pressão exercida sobre uma determinada superfície é dada pela expressão,

$$p = \frac{F}{A} \quad (23)$$

onde F é a força exercida e A é a área da superfície em causa.

A diferença entre o valor da pressão exercida pelo interior do molde sobre a placa (p_i) e o valor da pressão exercida pelo exterior sobre essa mesma placa (p_{am}) corresponde à pressão relativa, p_r . A área útil (actuada por esta diferença de pressão) é calculada como,

$$A = 0,15 \times 0,4 = 0,06 \text{ m}^2$$

Supondo um p_r de $1 \times 10^5 \text{ Pa}$ (1 bar), a força exercida sobre a placa é,

$$F = p_r \times A = 1 \times 10^5 \cdot 0,06 = 6000 \text{ N} = 600 \text{ kg}_f$$

Através deste cálculo simples é possível verificar que, supondo uma pressão relativa de 1 bar, a placa está sujeita a uma força equivalente a 600 kg_f . Por isso, é necessário especial cuidado na operação da instalação, de modo a não criar condições propícias à

ruptura do molde. Com o objectivo de aumentar a sua capacidade de resistência mecânica, foram usados grampos metálicos montados no sentido de impedir a “abertura” do molde.

3.3 Determinação da permeabilidade das espumas

A permeabilidade do reforço é uma medida inversa da resistência que este oferece a ser atravessado pela resina e, por isso, a ser impregnado por esta. O valor da permeabilidade fornece uma indicação da facilidade relativa com que o fluido viaja através do espaço poroso. Esta propriedade depende das características físicas desse espaço e, de entre elas, a tortuosidade, o arranjo e arquitectura das fibras.

Para determinadas configurações simples, uniformes e espacialmente periódicas, existem relações fechadas entre a porosidade e a permeabilidade do meio. Todavia, no caso de materiais fibrosos, a permeabilidade e a porosidade são usualmente tratadas como parâmetros independentes.

Com base nas espumas de poliuretano e à base de poliéster procedeu-se à determinação da sua permeabilidade através de uma técnica experimental gravimétrica.

Para a determinação da permeabilidade das espumas recorreu-se a uma montagem experimental concebida para o efeito, gentilmente dispensada pelo Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra, na qual se utilizou água para o referido estudo. A montagem consta de um recipiente em forma rectangular que contém água, assente sobre um suporte. A base desse recipiente possui uma saída, que permite a descarga de água, conectada a um tubo de plástico transparente que por sua vez permite a ligação a um porta-amstras que contém a amostra de espuma a analisar. É de referir que durante o decurso da experiência o nível de água no recipiente tem de permanecer constante. A amostra de espuma possui a forma de um cilindro com um diâmetro igual ao diâmetro interno do porta-amstras.

A água que atravessa a espuma do porta-amstras é recebida num recipiente que se encontra sobre uma balança (com uma exactidão de 0,01 g) ligada a um sistema de aquisição dos valores de massa de água durante um determinado intervalo de tempo.

A montagem experimental utilizada para a determinação da permeabilidade das espumas encontra-se na Figura 3.5.

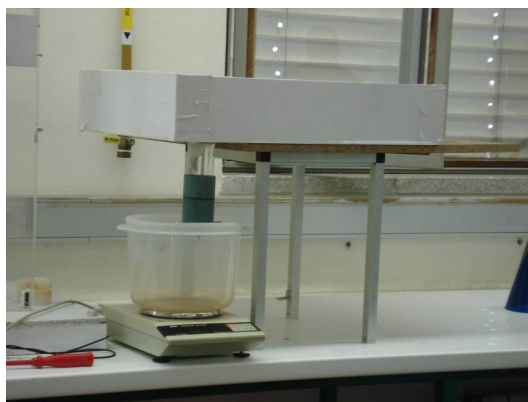


Figura 3.5 Montagem experimental utilizada para a determinação da permeabilidade das espumas - recipiente contendo água, suporte, porta-amostras, recipiente colector da água e balança.

O porta-amostras, que se apresenta na Figura 3.6, consiste num tubo em hidronil cujas paredes possuem 0,006 m de espessura. No seu interior encontram-se dois discos perfurados, um fixo em PVC (que se encontra na zona superior do porta-amostras) e outro em vidro acrílico que se move com o auxílio de um parafuso (localizado na zona inferior do porta-amostras) e permite compactar a amostra de espuma que se encontra localizada entre os dois discos. Através da compactação da espuma, a partir de diferentes espessuras desta, é possível obter diferentes valores de permeabilidade. A espessura final da amostra cilíndrica a compactar é de 0,01 m, que é a espessura interna da cavidade moldante.

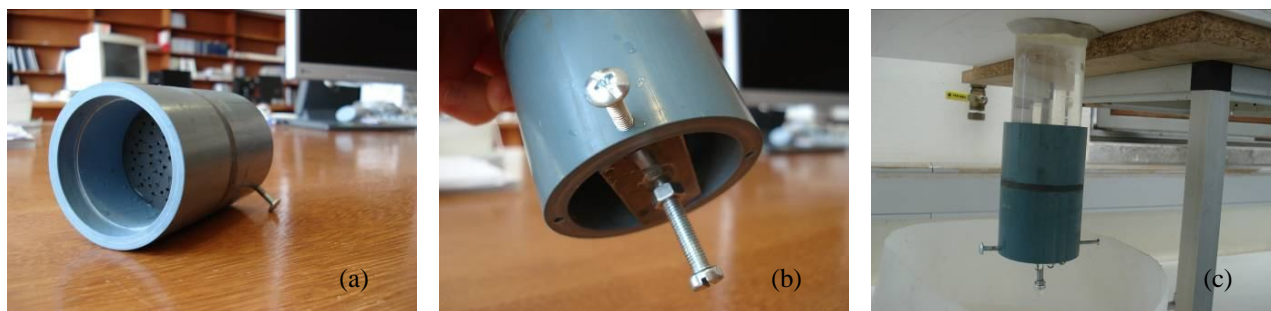


Figura 3.6 Porta-amostras, (a) vista superior do porta-amostras, onde é possível observar o disco perfurado em PVC, (b) vista inferior do porta-amostras onde é possível visualizar o parafuso móvel, (c) porta-amostras conectado ao tubo de plástico que provém do recipiente que contém água.

A determinação da permeabilidade das espumas baseia-se nas perdas de carga ocorridas durante o escoamento da água. Os cálculos envolvidos nessa determinação encontram-se detalhadamente relatados no Apêndice A.3.

Na Tabela 3.2 encontram-se compilados os valores de permeabilidade determinados.

Tabela 3.2 Valores de permeabilidade determinados.

Tipo de espuma	Ensaio	Espessura inicial, e_0 (m)	Espessura final, e_f (m)	Permeabilidade, K (m^2)
poliuretano	1	0,015	0.01	$8,23 \times 10^{-11}$
poliéster 30 <i>ppi</i>	2	0,0125		$2,92 \times 10^{-10}$
	3	0,03		$1,98 \times 10^{-10}$
	4	0,04		$1,50 \times 10^{-10}$
	5	0,05		$1,04 \times 10^{-10}$
poliéster 20 <i>ppi</i>	6	0,05		$1,21 \times 10^{-10}$
poliéster 15 <i>ppi</i>	7	0,0125		$3,10 \times 10^{-10}$

❖ Discussão

Através da análise dos valores obtidos das permeabilidades, verifica-se que, para a espuma de poliéster de 30 *ppi*, à medida que aumenta a espessura inicial a permeabilidade vai diminuindo (ensaios 2, 3, 4 e 5). A espuma com espessura mais elevada, ao ser comprimida fica sujeita a um aperto maior e consequentemente a um emaranhado de fibras mais acentuado oferecendo uma resistência maior ao escoamento do fluido.

Comparando os valores obtidos nos ensaios 2 e 7, visto as espumas possuírem a mesma espessura, observa-se uma permeabilidade maior para o ensaio 7, possivelmente devido ao facto da espuma de poliéster de 15 *ppi* possuir um grau de abertura maior e um arranjo das fibras diferente em relação à espuma de 30 *ppi*.

O ensaio 1, correspondente à amostra de espuma em poliuretano, é o que apresenta o valor mais baixo de permeabilidade.

As espumas escolhidas para utilizar como meio poroso na fase da simulação experimental do escoamento foram as correspondentes aos ensaios 1, 2 e 7 (assinalados a sombreado na tabela 3.2). As fotografias dessas amostras encontram-se na Figura 3.7.

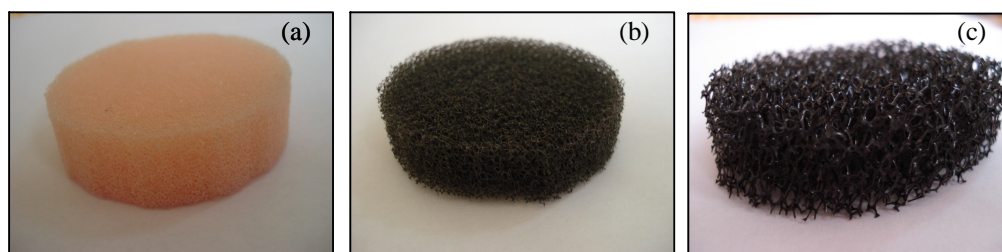


Figura 3.7 Amostras de espumas, (a) amostra de poliuretano com espessura 0,015 m, (b) amostra de poliéster 30 ppi com espessura 0,0125 m, (c) amostra poliéster 15 ppi com espessura 0,0125 m.

O valor de permeabilidade obtido no ensaio 1 é o mais próximo dos valores das permeabilidades das fibras de vidro (as comercialmente mais aplicadas em RTM). A gama de valores de permeabilidade dos meios porosos de fibra de vidro situa-se entre o valor de $2,4 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ e o valor $5,1 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ (Kaviany, 1995). A escolha das outras espumas recaiu nas que apresentavam valores de permeabilidade mais elevados para estudar o comportamento do enchimento em meios mais permeáveis.

3.4 Determinação da porosidade das espumas escolhidas

De modo a determinar a fracção de poros (espaços vazios) ou porosidade dos meios porosos escolhidos para efectuar os ensaios experimentais do escoamento, recorreu-se a um método experimental simples. Para tal, utilizaram-se as amostras representadas na Figura 3.7.

A partir da pesagem da amostra de espuma contida no porta-amostras (a utilização do porta-amostras deve-se à necessidade de determinar a porosidade das espumas comprimidas até perfazer 0,01 m de espessura), primeiro com a espuma seca e posteriormente com a espuma totalmente saturada com água, retira-se, através da diferença das duas massas, o valor do volume de poros. Com o volume de poros e através do

conhecimento do volume da amostra comprimida (volume total), determina-se a porosidade, ε :

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{vazios}}}{V_{\text{total}}} \quad (24)$$

O procedimento de cálculo das porosidades está descrito no Apêndice A.4.

Tabela 3.3 Valores de porosidade determinados.

Tipo de espuma	Espessura inicial, e_0 (m)	Espessura final, e_f (m)	Porosidade, ε (%)
poliuretano	0,0150	0,01	40,9
poliéster 30 <i>ppi</i>	0,0125		45,5
poliéster 15 <i>ppi</i>	0,0125		44,9

❖ Discussão

Os valores de porosidade determinados são muito baixos, relativamente aos esperados, particularmente o valor de porosidade da espuma à base de poliéster de 15 *ppi*. Uma possível explicação para justificar uma porosidade inferior à da amostra de 30 *ppi* é o facto desta espuma possuir um grau de abertura bastante considerável, mesmo sujeita a compressão, o que faz com que no momento do embebimento da amostra com água previamente à pesagem, a água tenda a cair por gravidade. Para além disso, as paredes das células da espuma de 15 *ppi* são mais espessas.

Capítulo 4

Resultados e discussão

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nas diferentes simulações experimentais e numéricas realizadas.

A primeira parte do estudo diz respeito à avaliação da vedação do molde. A segunda parte inclui a análise do escoamento para diferentes velocidades de entrada e para diferentes larguras do canal lateral entre o meio poroso e a cavidade moldante. Na terceira parte far-se-á uma simulação numérica do processo de enchimento e comparar-se-ão os resultados com aqueles obtidos por via experimental

4.1 Testes de vedação do molde

Os testes de vedação ao molde foram efectuados sem qualquer tipo de fibra no interior da cavidade moldante.

O depósito foi atestado com óleo. Após ligada a bomba hidráulica, o óleo começou a fluir até entrar na cavidade moldante, altura em que se registaram muitas fugas, não só entre os terminais das condutas e as estruturas metálicas de ligação ao molde como também nas zonas laterais delimitadas pelos o-rings. Além disso, devido ao facto de as placas em acrílico que constituem o molde terem sido maquinadas, mais concretamente ao nível das depressões longitudinais para a colocação dos o-rings, uma das placas não resistiu à pressão oferecida pelo fluido e fracturou.

Com o intuito de solucionar o problema, e permitir a utilização segura de maiores pressões de enchimento, optou-se por substituir a placa fracturada por uma de maior espessura (0,015 m), descartar a solução dos o-rings e retirar a conduta ligada à saída do molde passando o sistema a operar em circuito aberto. Colocou-se papel de junta entre as placas nas suas margens.

A configuração em “sanduíche” levou ainda um conjunto de grampos metálicos para ajustar e reforçar as placas sobrepostas, tal como se observa na Figura 4.1. A estrutura metálica ligada à placa mediana do “sanduíche”, da zona de entrada do fluido, foi substituída por uma pequena placa em vidro acrílico de “sacrifício”. Esta é ligada directamente à estrutura “sanduíche”. A tela de vedação em borracha foi retirada e entre o terminal da conduta e a placa de sacrifício foi colocado papel de junta.

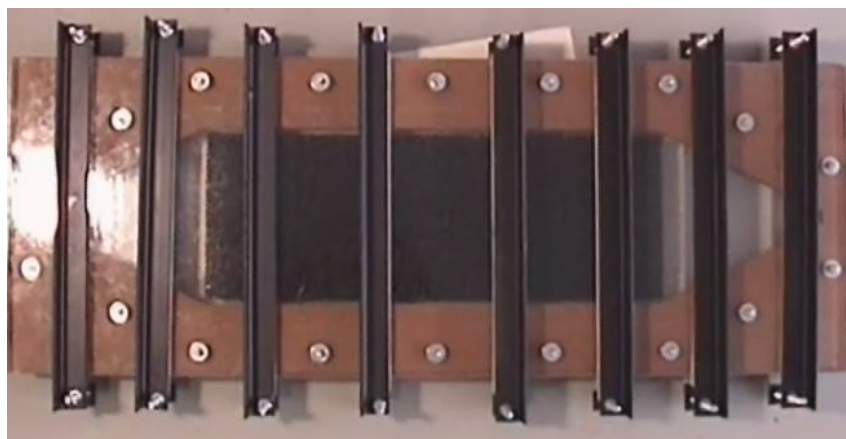


Figura 4.1 Estrutura em acrílico com grampos metálicos de ajuste e reforço.

❖ *Discussão*

As alterações efectuadas na estrutura em “sanduíche” surtiram efeito em termos de fugas de óleo. O papel de junta ao ficar embebido com o fluido viscoso provocou um efeito estanque, impedindo qualquer tipo de fugas nas zonas laterais do molde. O problema das fugas à entrada também foi minimizado.

4.2 Simulação experimental do processo de enchimento

O estudo do escoamento de enchimento da cavidade moldante a partir da simulação experimental é realizado através do recurso às imagens dos vídeos das experiências.

Na placa do topo do “sanduíche” foi colocada uma quadrícula para acompanhar mais detalhadamente o decurso do escoamento. Cada quadrado da grelha possui 0,01 m de lado. Tendo por base as imagens recolhidas, as frentes do escoamento foram delineadas para diversos instantes de tempo.

4.2.1 Análise do escoamento para diferentes velocidades de entrada

As dimensões das espumas utilizadas na simulação experimental do processo de enchimento para diferentes velocidades de entrada estão compiladas na tabela 4.1. A espessura final de todas as espumas é de 0,01 m, a espessura interna da cavidade moldante.

Tabela 4.1 Dimensões das espumas utilizadas na simulação experimental do processo de enchimento.

Espuma	Largura (m)	Comprimento (m)	Espessura inicial (m)
poliuretano	0,14	0,40	0,0150
poliéster 30 <i>ppi</i>	0,14	0,40	0,0125
poliéster 15 <i>ppi</i>	0,14	0,40	0,0125

A dimensão da cavidade moldante útil é, como já foi referido, (0,15 m) x (0,4 m) x (0,01 m) e cada meio poroso foi colocado centralmente na cavidade. Dada a largura de cada espuma, os dois canais desobstruídos (um de cada lado), para estudar o efeito “*race tracking*”, possuem 0,005 m de largura. A Figura 4.2 mostra a esquematização da geometria do molde preenchido parcialmente com o meio poroso.

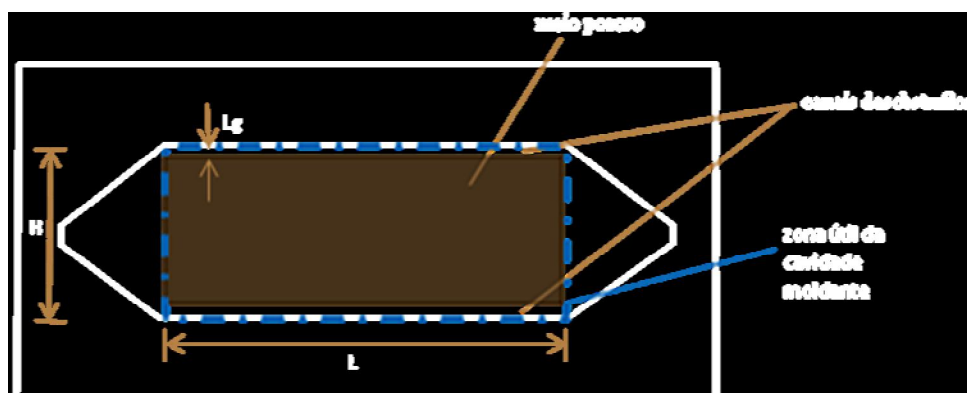


Figura 4.2 Esquematização da geometria do molde preenchido parcialmente com o meio poroso.

Nesta etapa, foram impostas duas velocidades de entrada do fluido na parte do molde com interesse (zona da cavidade moldante útil).

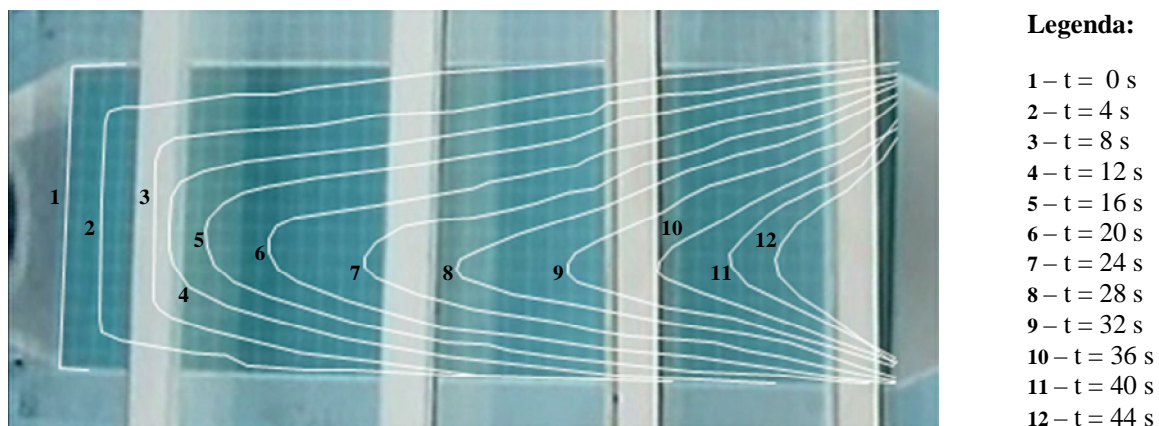
Os filmes obtidos para cada um dos processos de enchimento encontram-se no CD que se constitui como o Apêndice A.5 do presente trabalho.

i) Velocidade de entrada de 0,01 m/s

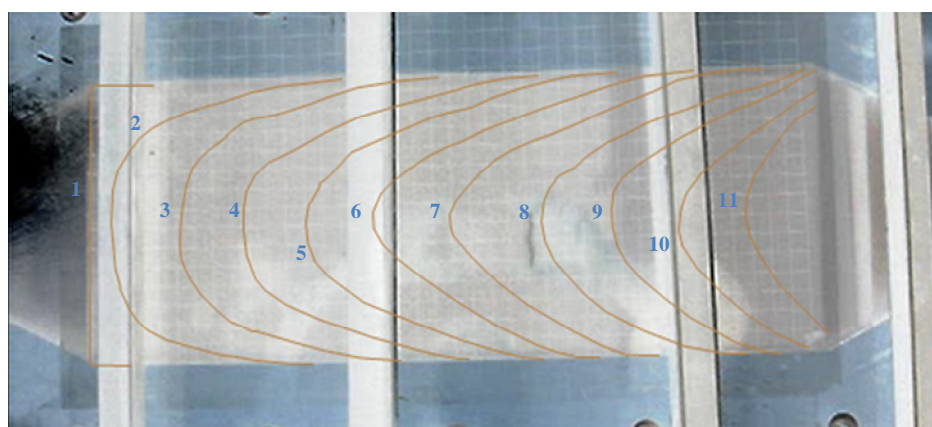
A válvula reguladora de caudal foi ajustada de modo a debitar um caudal de óleo de $1,5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, ou seja, uma velocidade uniforme de entrada do fluido de 0,01 m/s.

Os contornos das frentes de escoamento foram traçados de 4 em 4 segundos a partir do momento em que o fluido começa a impregnar o meio poroso (tomado como o instante de tempo $t=0 \text{ s}$).

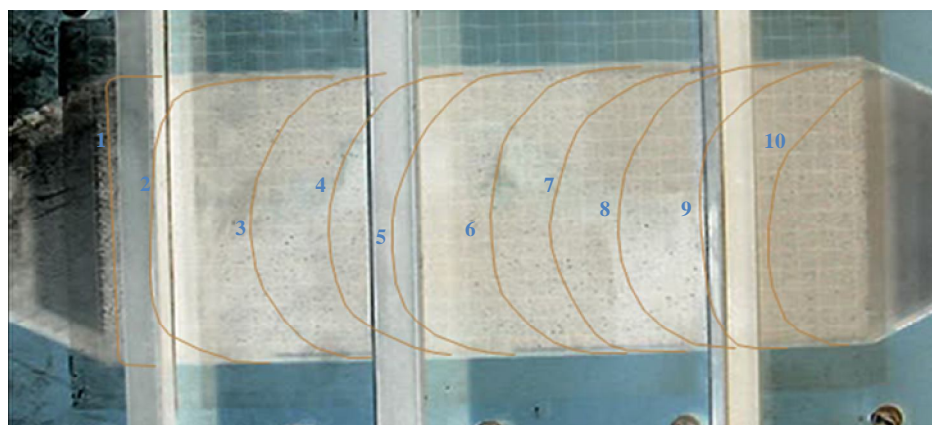
Os perfis do escoamento para cada meio poroso utilizado podem ser observados na Figura 4.3.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.3 Frentes do escoamento experimental para a velocidade de 0,01 m/s e “gap” de 0,005 m, (a) espuma de poliuretano, (b) espuma à base de poliéster de 30 ppi, (c) espuma à base de poliéster de 15 ppi.

❖ Discussão

Observando as Figuras 4.3 (a), (b) e (c) é possível verificar um escoamento preferencial (“*race tracking*”) pelos canais livres do meio poroso, durante o tempo de impregnação deste. Quando é deixado um “*gap*” entre a pré-forma e a parede do molde, o fluido escoar mais rapidamente ao longo desse canal porque essa zona oferece menos resistência ao escoamento.

Através dos vídeos dos escoamentos é possível retirar o tempo que o fluido demora a impregnar na totalidade cada meio poroso.

O tempo total de escoamento para a espuma de poliuretano foi de 60 segundos. As espumas de 30 ppi e de 15 ppi foram completamente impregnadas durante 45 e 42 segundos, respectivamente.

A espuma em poliuretano apresenta o tempo de preenchimento mais elevado porque é, das três espumas, a que possui uma permeabilidade mais baixa ($8,23 \times 10^{-11} \text{ m}^2$) oferecendo uma resistência maior ao escoamento do fluido. Os tempos de preenchimento das restantes espumas são inferiores, de acordo com os valores das suas permeabilidades ($2,92 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ para a espuma de 30 ppi e $3,10 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ para a espuma de 15 ppi).

Na Figura 4.3 (a), à medida que o escoamento avança, as linhas da frente de escoamento vão se tornando curvas com concavidade mais acentuada até ao momento em que o fluido começa a aproximar-se do final do comprimento da espuma. A partir desta altura a concavidade das curvas é novamente atenuada. Na Figura 4.3 (b) observa-se a mesma situação, embora de uma forma menos pronunciada.

Através do acompanhamento dos vídeos das experiências, é possível observar, especialmente nas experiências correspondentes às espumas em poliuretano e de 30 ppi, um escoamento transversal entre o “*gap*” e o meio poroso, como exemplificado na Figura 4.4. Segundo alguns autores (Hammami *et al.*, 1998), este tipo de escoamento depende da permeabilidade da pré-forma porosa e provoca uma diminuição na velocidade do fluido na região livre.

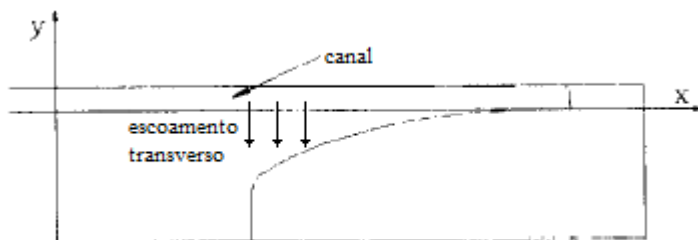


Figura 4.4 Exemplificação do escoamento transverso.

O escoamento é preferencial nas zonas desobstruídas (“gaps”) porque a permeabilidade é muito maior nesses locais.

Ao diminuir a permeabilidade do meio poroso torna-se cada vez mais importante o escoamento através dos canais laterais, e o “*edge effect*” assume uma importância maior. Situações há em que o escoamento nos canais avança de tal modo, face ao escoamento através do meio poroso, que se criam zonas não impregnadas no seu interior, originando peças com bolsas de ar no seu interior.

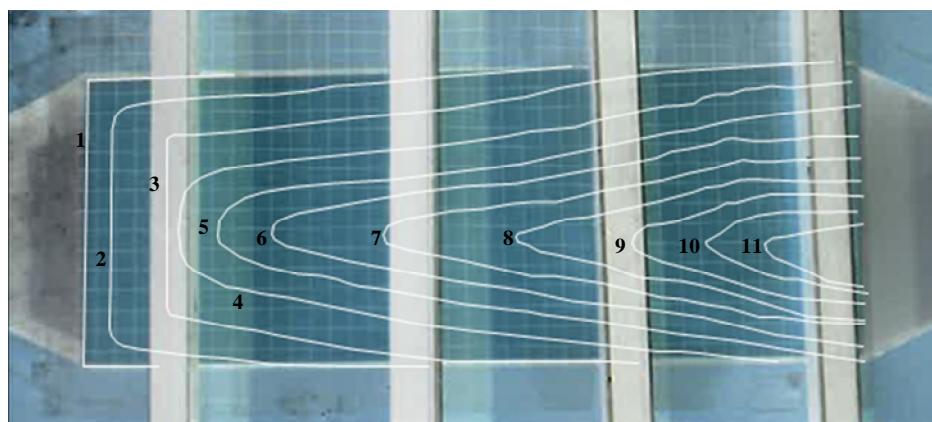
É importante referir que a ausência de simetria verificada na imagem 4.3 (a) pode ser explicada pela dificuldade em centrar a espuma face à cavidade moldante.

ii) Velocidade de entrada de 0,02 m/s

Nesta etapa, a válvula reguladora de caudal foi ajustada de modo a debitar um caudal de óleo de $3 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, ou seja, uma velocidade uniforme de entrada do fluido de 0,02 m/s.

Os contornos das frentes de escoamento foram traçados de 2 em 2 segundos a partir do momento em que o fluido começa a impregnar o meio poroso (instante de tempo $t=0 \text{ s}$).

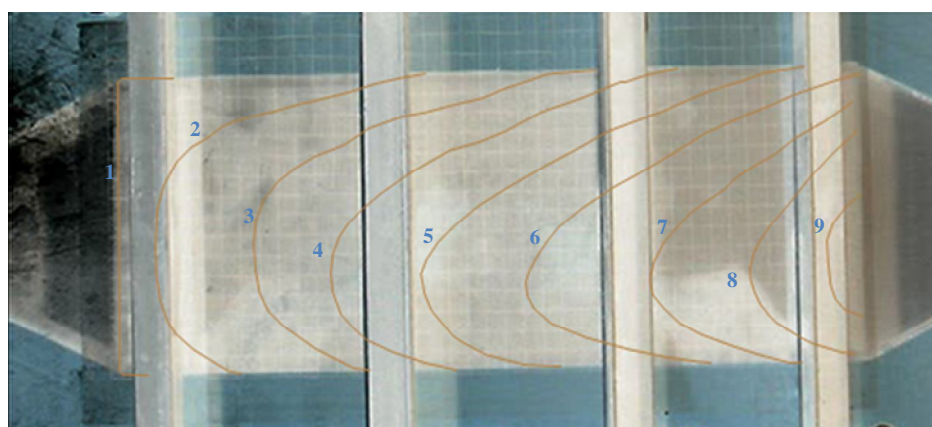
A Figura 4.5 mostra as frentes do escoamento para cada meio poroso utilizado.



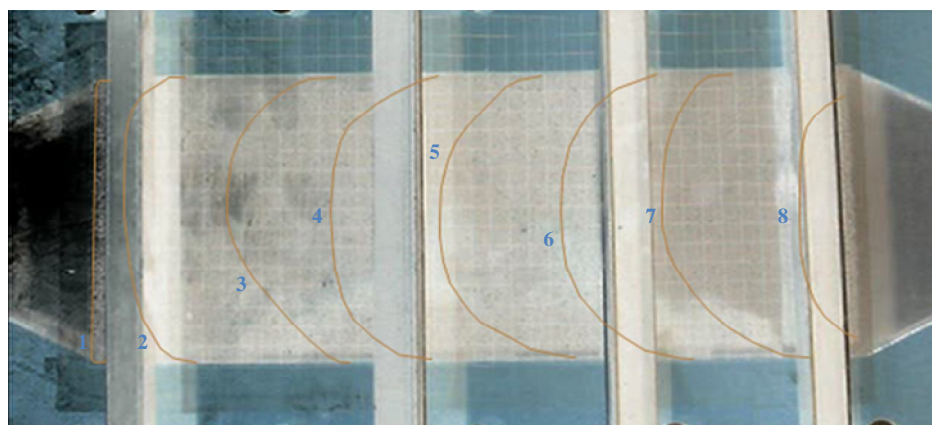
Legenda:

- 1 – $t = 0$ s
- 2 – $t = 2$ s
- 3 – $t = 4$ s
- 4 – $t = 6$ s
- 5 – $t = 8$ s
- 6 – $t = 10$ s
- 7 – $t = 12$ s
- 8 – $t = 14$ s
- 9 – $t = 16$ s
- 10 – $t = 18$ s
- 11 – $t = 20$ s

(a)



(b)



(c)

Figura 4.5 Frentes do escoamento experimental para a velocidade de 0,02 m/s e “gap” de 0,005 m, (a) espuma de poliuretano, (b) espuma à base de poliéster de 30 ppi, (b) espuma à base de poliéster de 15 ppi.

❖ Discussão

Através das figuras é possível visualizar um escoamento bi-regional ainda mais vincado do que no caso anterior.

O tempo que o fluido levou até preencher na totalidade a espuma em poliuretano foi 24 segundos. Para as espumas à base de poliéster, o tempo total de impregnação foi de 19 segundos para a de 30 ppi e de 16 segundos para a de 15 ppi.

Também nas imagens correspondentes às Figuras 4.5 (a) e (b) se verifica ausência de simetria.

De referir que, os contornos das frentes dos escoamentos equivalem aos perfis de velocidade do fluido.

4.2.2 Análise do escoamento para diferentes larguras do canal

As dimensões das espumas utilizadas no estudo do escoamento para diferentes larguras do canal desobstruído, bem como as dimensões dos “gaps” disponibilizados por essas espumas, encontram-se compiladas na Tabela 4.2. Cada meio poroso é colocado centralmente na cavidade.

Tabela 4.2 Dimensões das espumas utilizadas no escoamento para diferentes larguras do “gap” e dimensões deste.

Espuma	Largura (m)	Comprimento (m)	Espessura inicial (m)	Largura dos “gaps” (m)
poliuretano	0,14	0,40	0,0150	0,005
poliuretano	0,13	0,40	0,0150	0,01

Para este estudo foi imposta a velocidade de entrada uniforme de 0,01 m/s.

i) “Gap” de 0,005 m

As frentes de enchimento para a espuma com um “gap” de 0,005 m estão representadas na Figura 4.6.

Os contornos das frentes de enchimento foram traçados de 4 em 4 segundos a partir do momento em que o fluido começa a impregnar o meio poroso (instante de tempo $t=0$ s).

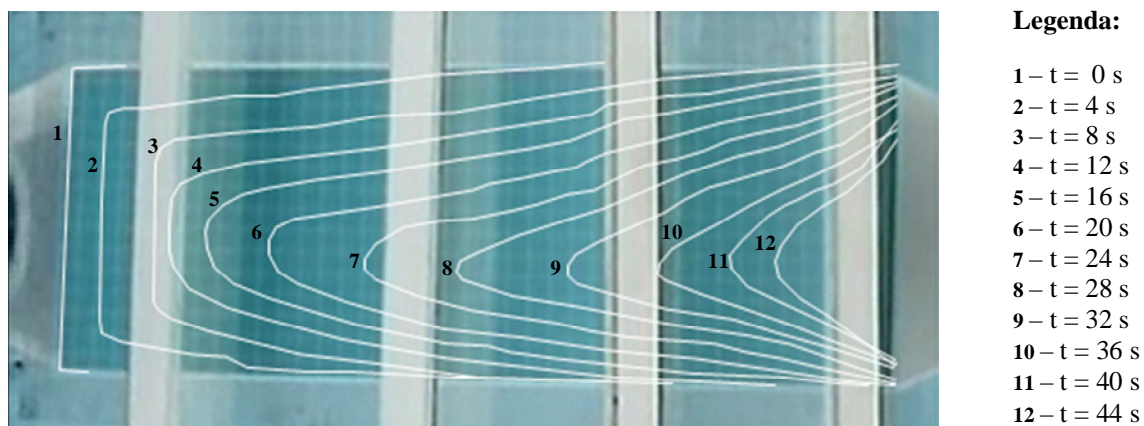


Figura 4.6 Frentes do escoamento experimental para a espuma em poliuretano com “gap” de 0,005 m.

ii) “Gap” de 0,01 m

As frentes de enchimento para a espuma com um “gap” de 0,01 m estão representadas na Figura 4.7.

Os contornos das frentes de escoamento foram traçados em intervalos de tempo não constantes a partir do momento em que o fluido começa a impregnar o meio poroso (instante de tempo $t=0$ s).

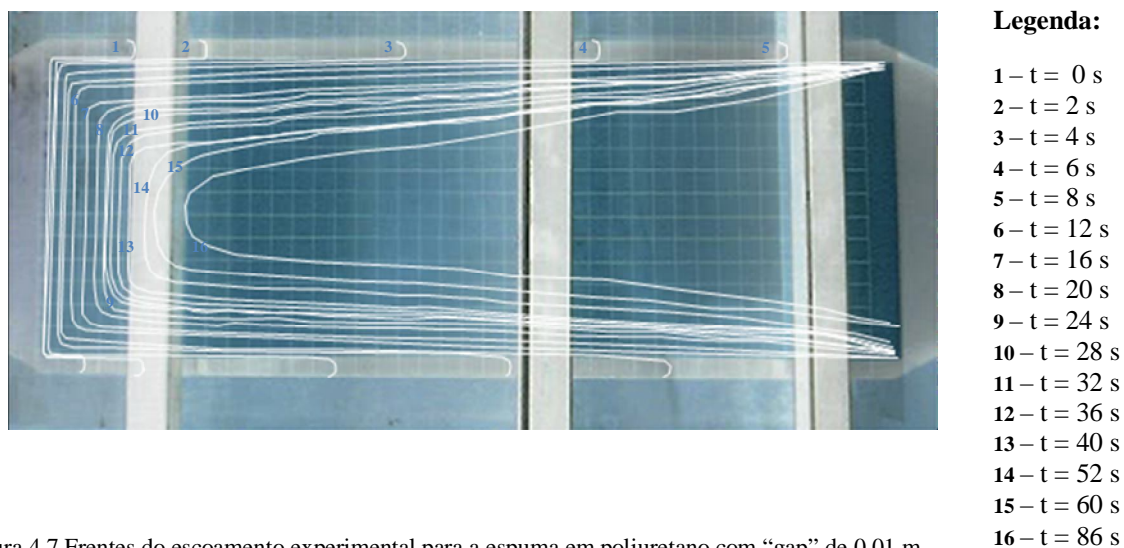


Figura 4.7 Frentes do escoamento experimental para a espuma em poliuretano com “gap” de 0,01 m.

❖ Discussão

O fenómeno “*race tracking*” é verificado em ambas as experiências embora na realizada com um “*gap*” superior assuma maior importância. Nesta, o fluido escoava rapidamente pelos canais laterais e apenas muito lentamente é que vai trespassando o meio poroso. A espuma não chegou a ser impregnada na sua totalidade devido ao facto do depósito não possuir capacidade suficiente para a quantidade de óleo necessária ao escoamento completo. De qualquer forma, levou-se o escoamento até aos 88 segundos.

A experiência realizada com o “*gap*” de 0,01 m é importante na medida em que permite evidenciar o perfil da frente de escoamento nas bordas do molde, ainda que apenas nos primeiros instantes de tempo devido à elevada velocidade com que o óleo flui nessas zonas. Deste modo, no domínio aberto, observa-se um perfil de velocidades aproximadamente parabólico.

Apesar de se tratar do mesmo tipo de espuma, o fluido apresenta muito mais dificuldade em atravessar o meio poroso no segundo caso, demonstrando perfis quase rectilíneos nos primeiros segundos do escoamento. Isto indica que, mantendo a mesma espuma (portanto, o mesmo valor de permeabilidade), mas aumentando a largura do canal, o “*channeling effect*” assume uma importância maior levando a um modelo de escoamento completamente distinto.

4.3 Simulação numérica do processo de enchimento

A simulação numérica do processo de enchimento da cavidade moldante é realizada considerando apenas a zona útil da cavidade moldante (parte rectangular da cavidade representada a tracejado de cor laranja na Figura 4.2). Esta zona útil, quer na parte livre quer na parte preenchida com o meio poroso, está inicialmente preenchida com ar e, iniciado o processo de enchimento, este ar vai sendo expulso pelo fluido (óleo) que vai entrando.

Ambos os fluidos (ar e óleo) são considerados ser incompressíveis e de propriedades constantes, e o processo de enchimento tem lugar a temperatura constante.

Em termos formais, antes do processo de enchimento ter início, o ar contido na cavidade moldante encontra-se com velocidade nula, isto é

$$u_x = u_y = 0 \quad t = 0, \quad \forall (x, y) \quad (25)$$

e, como apenas existe ar no interior da cavidade:

$$f = 0 \quad t = 0, \quad \forall (x, y) \quad (26)$$

em que f é a fracção volúmica, definida em cada ponto como

$$f = \frac{V_{\text{líquido}}}{V_{\text{total}}} = \frac{V_{\text{líquido}}}{V_{\text{líquido}} + V_{\text{ar}}} \quad (27)$$

Num ponto em que apenas existe ar $f = 0$ e, num ponto em que apenas existe líquido $f = 1$. Num ponto em que exista, em termos de volume, tanto ar como líquido a fracção volúmica toma o valor $f = 0,5$.

As propriedades relevantes do meio fluido são obtidas através de uma média aritmética simples das propriedades do líquido e do ar. Assim,

$$\rho = f \rho_{\text{líquido}} + (1 - f) \rho_{\text{ar}} \quad (28)$$

$$\mu = f \mu_{\text{líquido}} + (1 - f) \mu_{\text{ar}} \quad (29)$$

À medida que o fluido viscoso vai preenchendo o meio, a fracção volúmica vai aumentando e as propriedades relevantes do meio, em cada ponto, vão sendo alteradas em conformidade.

Assim que se inicia o processo de enchimento, $t > 0$, a velocidade imposta na entrada é,

$$(u_x)_{x=0} = u_{\text{entrada}}, \quad (u_y)_{x=0} = 0 \quad (30)$$

enquanto que, nas fronteiras sólidas da cavidade, a velocidade é nula, isto é,

$$u_x = u_y = 0 \quad (31)$$

Na saída do molde, considera-se uma condição fronteira do tipo parabólico, isto é, admite-se que nessa zona não há gradientes notórios de velocidade. Desta forma,

$$x = L, \quad \frac{\partial u_x}{\partial x} = \frac{\partial u_y}{\partial x} = 0 \quad (32)$$

As equações (30), (31) e (32) são as condições de fronteira relativas à velocidade do óleo sobre a totalidade do domínio de cálculo.

A pressão é determinada por integração da equação de conservação de massa (equação da continuidade), não sendo necessário estabelecer nenhuma condição fronteira para a variável pressão.

No que concerne à fracção volúmica, uma vez iniciado o processo de enchimento, para $t > 0$, impõe-se que à entrada existe líquido a penetrar na cavidade moldante, ou seja,

$$(f)_{x=0} = 1 \quad (33)$$

É importante referir que a simulação numérica é realizada apenas considerando metade (meia largura) da cavidade moldante, assumindo que existe simetria física do problema. A simetria geométrica está assegurada, e dadas as condições impostas existem condições para a verificação de geometria física. Assim sendo, a parede central (parede inferior) do molde, para $y=0$, é um plano de simetria, o qual não é atravessado pelo escoamento,

$$(u_y)_{y=0} = 0 \quad (34)$$

para além disso, os gradientes das variáveis envolvidas na direcção perpendicular ao plano de simetria são nulos, ou seja,

$$\left(\frac{\partial u_x}{\partial y} = \frac{\partial u_y}{\partial y} = \frac{\partial f}{\partial y}\right)_{y=0} = 0 \quad (35)$$

A fracção volúmica f é determinada por resolução da equação diferencial,

$$\frac{\partial(\varepsilon f)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i f) = 0 \quad (36)$$

O modelo físico correspondente ao problema descrito é resolvido numericamente usando um software desenvolvido internamente, tratando-se de um método numérico de elementos finitos baseados em volumes de controlo (CV/FEM) (Costa *et al.*, 1995; Costa *et al.*, 2004; Baliga, 1997).

As componentes de velocidade e as restantes variáveis são calculadas nos mesmos nodos da malha de elementos finitos, pelo que se diz tratar-se de um método numérico de *ordem igual*, e é usado um esquema compressivo especial para a integração da equação diferencial para a fracção volúmica, de modo a diminuir a difusão numérica, ou artificial, introduzida pelos esquemas convectivos usuais para as outras variáveis (Costa, 2004).

Este software tem sido aplicado com sucesso na simulação de escoamentos em domínios livres, meios preenchidos com um meio poroso saturado com um fluido, e meios híbridos, isto é, apenas parcialmente preenchidos com um meio poroso saturado com um

fluido. Partindo da solução inicial, o cálculo vai progredindo no tempo, passo de tempo a passo de tempo, sendo usado um método totalmente implícito para resolver a componente transitória do problema. Desta forma, para cada nível de tempo, são estabelecidas e resolvidas as equações de discretização para as componentes de velocidade, para a pressão e para a fracção volúmica, e só depois de devidamente convergidas para todos os nodos se passa ao nível de tempo seguinte.

O passo de tempo a usar deve ser determinado com base na física do problema em estudo e na malha espacial de cálculo usada, devendo ser respeitada a condição de Courant,

$$\Delta t \leq \left(\frac{\Delta l}{\left| \vec{V} \right|} \right)_{\min} \quad (37)$$

Para o problema em análise, a velocidade é máxima segundo x na zona livre entre o meio poroso e a parede da cavidade moldante, pelo que

$$\Delta t \leq \frac{\Delta l_x}{u_{\max}} \quad (38)$$

onde Δl_x é o espaçamento da malha segundo a direcção do escoamento principal, x .

Na situação limite em que praticamente todo o fluido flui pela zona livre,

$$u_{\max} = \frac{(H/2)}{L_g} u_{\text{entrada}} \quad (39)$$

em que $\frac{H}{2}$ é a meia largura da cavidade moldante e L_g é a largura da zona livre (“gap”) entre a parede da cavidade moldante e o meio poroso.

Conjugando as equações acima resulta que o passo de tempo a usar deve obedecer à seguinte relação,

$$\Delta t \leq \frac{L_g}{(H/2) u_{entrada}} \frac{\Delta l_x}{\Delta l_x} \quad (42)$$

Este critério para o cálculo do passo de tempo é imposto sobretudo pela física do problema e não pelo método numérico usado, uma vez que, se está a usar um método totalmente implícito, que não impõe, por si mesmo, restrições ao passo de tempo usado. Os resultados numéricos apresentados foram obtidos considerando um intervalo de tempo $\Delta t = 0,0375s$, e uma malha espacial com 75 colunas de nodos na direcção do escoamento e com 55 linhas de nodos na direcção perpendicular à direcção principal do escoamento, sendo que 15 destas linhas de nodos correspondem ao canal lateral (“gap”). Os resultados foram ainda obtidos num computador equipado com um processador Intel 486 a 3,416 GHz, e uma memória RAM de 512 Mb, operando com o sistema operativo Windows XP Professional.

O tempo de cálculo para cada intervalo de tempo de $\Delta t = 0,0375s$ foi de 76s.

4.3.1 Análise do escoamento para diferentes larguras do canal

Com o intuito de fazer uma comparação com os resultados obtidos pela via experimental, foram realizadas simulações numéricas para as duas espumas em poliuretano cujas experiências foram relatadas em 4.2.2.

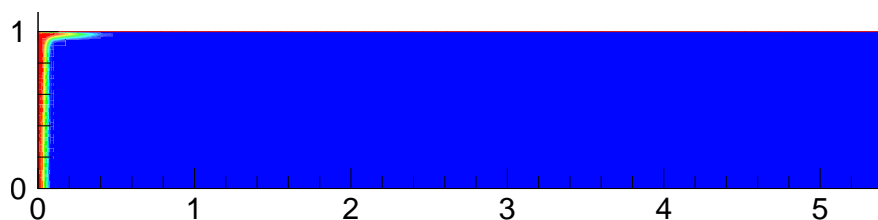
As frentes de enchimento estão representadas pelas diversas cores.

Como já foi referido, a simulação numérica é realizada considerando somente metade (meia largura) da cavidade moldante. Assim, a distância entre cada traço correspondente a uma unidade (por exemplo, entre 1 e 2) equivale a 7,5 cm (falar-se-á, nos próximos subcapítulos, em *cm* pelo facto de estarem envolvidas medidas muito pequenas). A distância entre cada traço correspondente a uma subunidade (por exemplo, entre 0,2 e 0,4) equivale a 1,5 cm.

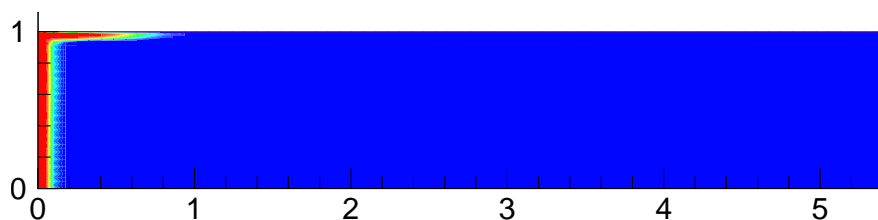
O intervalo de tempo usado nas figuras corresponde a $\Delta t = 0,375s$. A cor vermelha corresponde a $f = 1$ (todo o fluido presente é líquido) e a cor azul corresponde a $f = 0$ (todo o fluido presente é ar).

i) “Gap” de 0,005 m

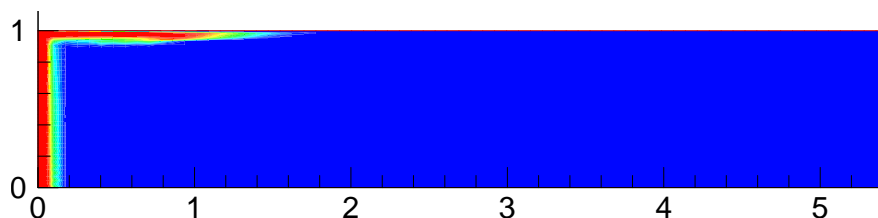
Os resultados numéricos para a espuma em poliuretano com um “gap” de 0,005 m estão representados na Figura 4.8.



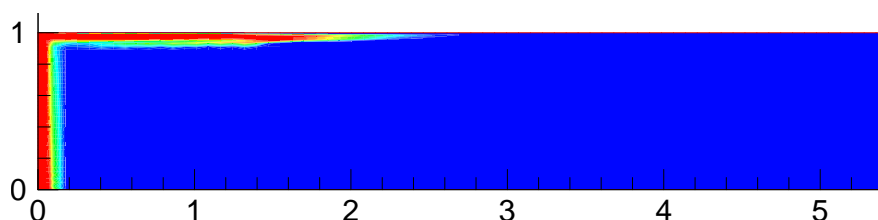
(a) $t = 0,375$ s



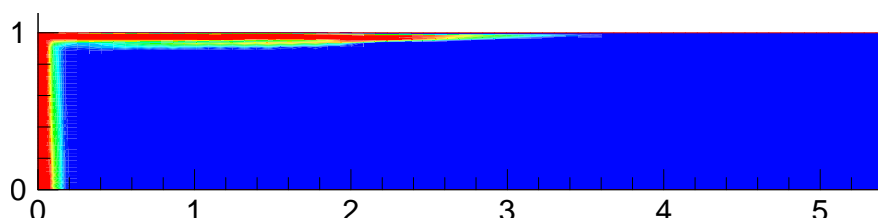
(b) $t = 0,750$ s



(c) $t = 1,125$ s



(d) $t = 1,500$ s



(e) $t = 1,875$ s

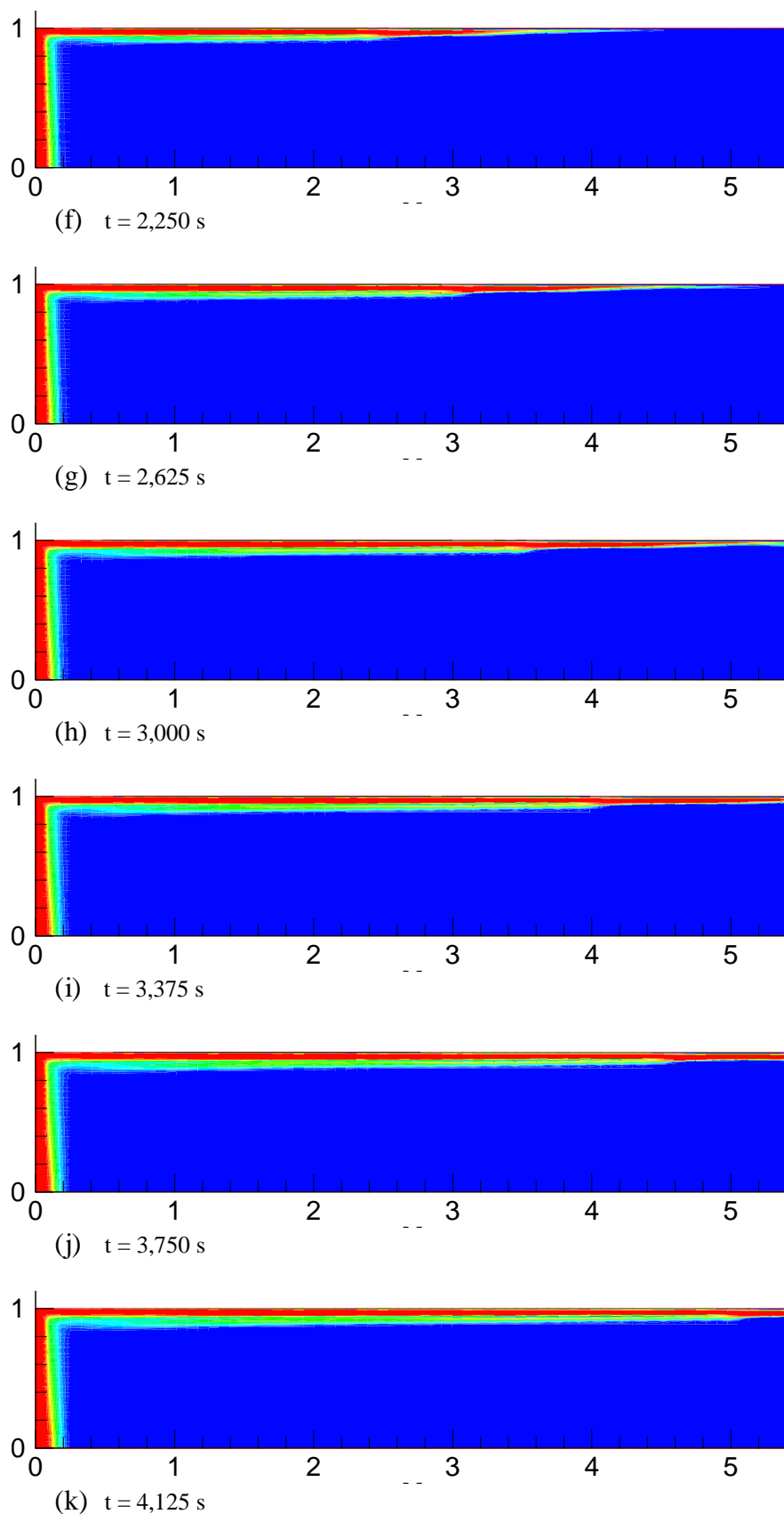
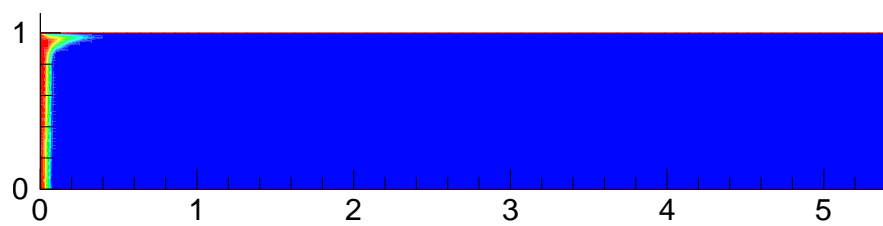


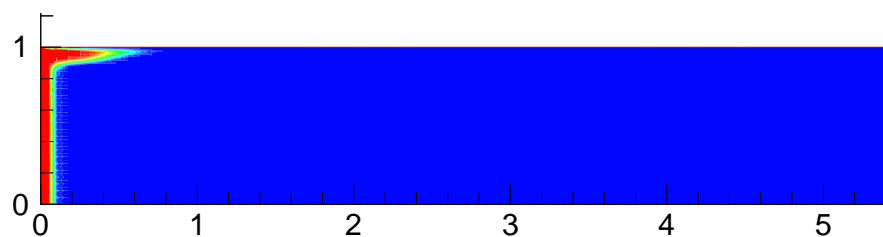
Figura 4.8 Resultados numéricos para a espuma em poliuretano com um “gap” de 0,005 m.

iii) “Gap” de 0,01 m

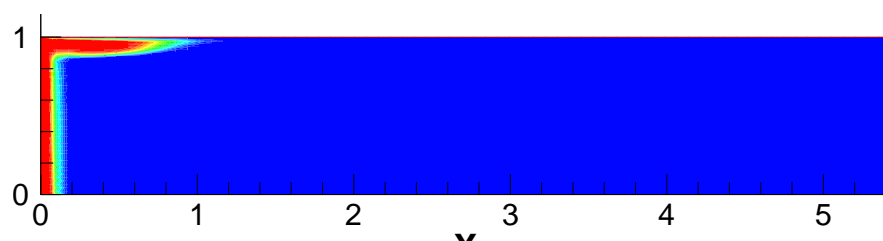
Os resultados numéricos para a espuma em poliuretano com um “gap” de 0,01 m estão representados na Figura 4.9



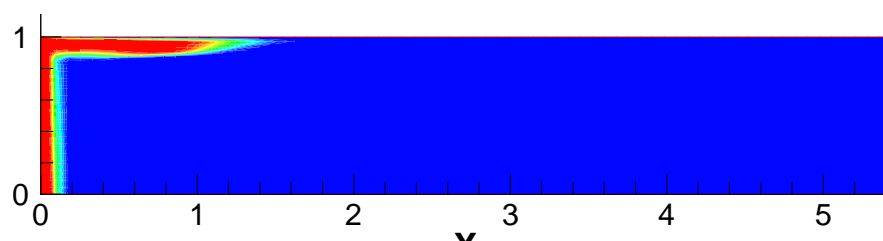
(a) $t = 0,375$ s



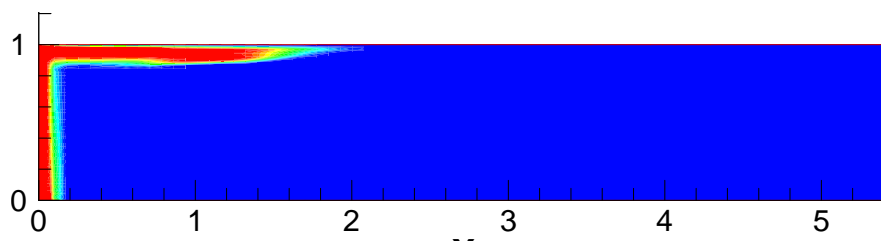
(b) $t = 0,750$ s



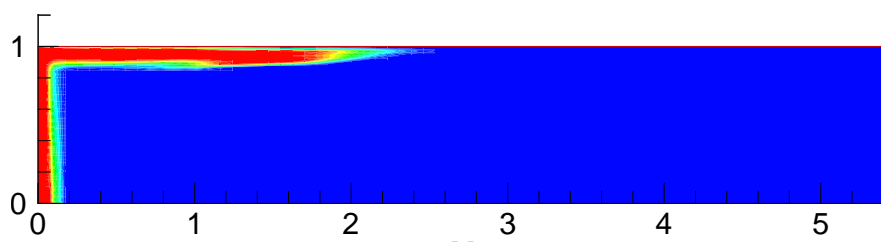
(c) $t = 1,125$ s



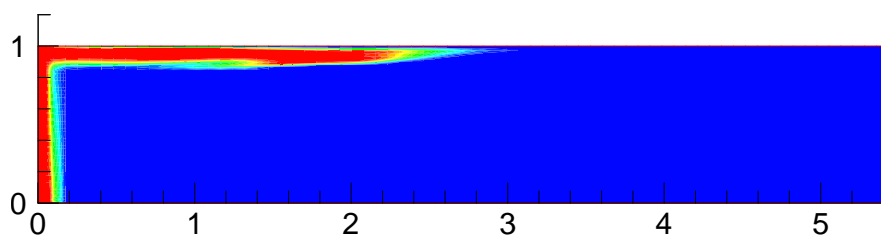
(d) $t = 1,500$ s



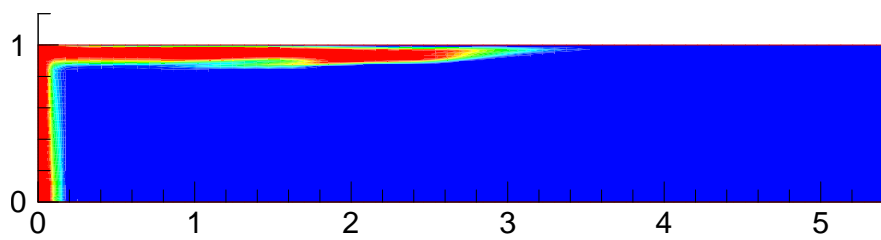
(e) $t = 1,875$ s



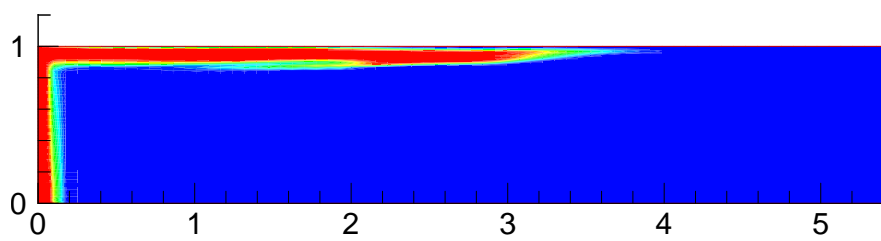
(f) $t = 2,250$ s



(g) $t = 2,625$ s



(h) $t = 3$ s



(i) $t = 3,375$ s

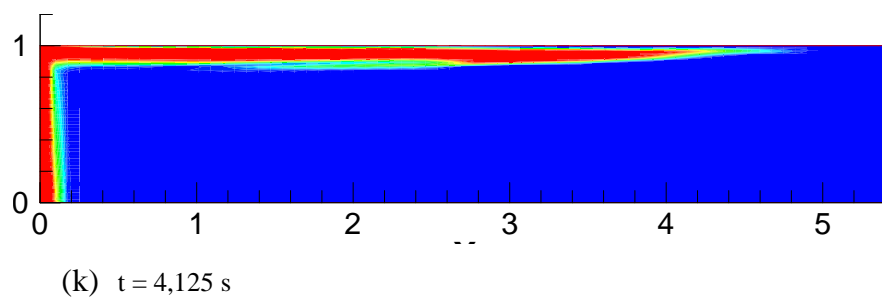
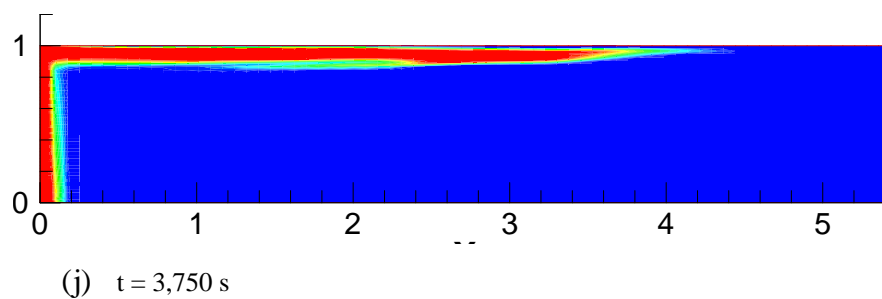
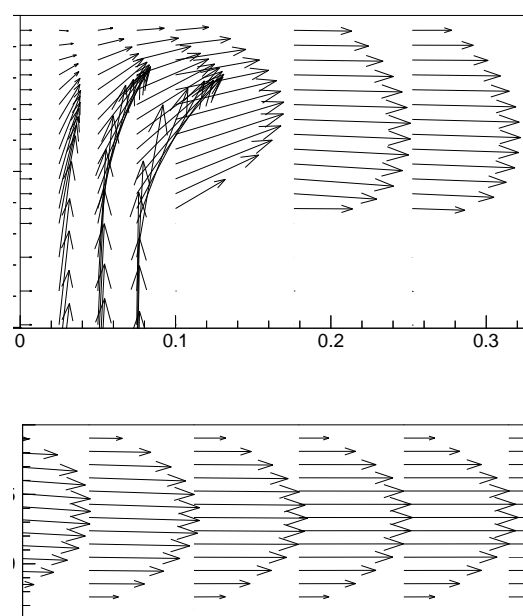


Figura 4.9 Resultados numéricos para a espuma em poliuretano com um “gap” de 0,01 m.

Os perfis de velocidade na zona do “gap” obtidos numericamente para o caso em que $L_g = 0,01 \text{ m}$, estão esquematizados na Figura 4.10.



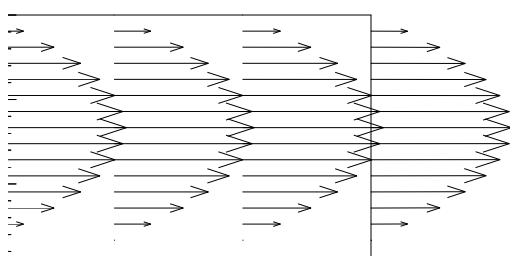


Figura 4.10 Perfis de velocidade na zona “gap”, (a) na entrada, (b) a meio do comprimento da cavidade moldante, (c) na saída.

4.4 Comparação dos resultados experimentais e numéricos

Considerando os resultados correspondentes à espuma com um “gap” de 0,005 m e fazendo uma comparação entre eles, é notória uma ligeira progressão mais rápida do escoamento no meio poroso, na figura relativa ao modo experimental. Aos 4 segundos (4,125 segundos para o caso numérico), no meio poroso, a frente do escoamento percorreu cerca de 2 cm para o caso experimental, e cerca de 1,5 cm para o caso numérico. No entanto, no caso numérico, nesse instante de tempo, o fluido já tinha percorrido o comprimento total da zona “gap” ao contrário do escoamento experimental.

Note-se que a comparação entre as imagens apenas é viável até à linha de escoamento número 2 da imagem correspondente ao caso experimental (Figura 4.6).

Na situação em que o “gap” é de 0,01 m, a progressão do escoamento no caso numérico, nos primeiros instantes de tempo, é ligeiramente superior (tanto no meio poroso como no canal desobstruído) relativamente à do caso experimental.

De qualquer forma, os resultados numéricos são relativamente concordantes com os experimentais no que concerne aos perfis de escoamento. A forma rectilínea das linhas de escoamento, no interior do meio poroso, nos primeiros segundos, é patente nas imagens referentes aos resultados numéricos.

Não foram apresentados resultados numéricos para tempos superiores porque a sua obtenção implicaria um elevado tempo de cálculo. Além disso, a discrepância dos perfis de escoamento iria ser cada vez maior, já que à medida que o tempo decorre os resultados numéricos apresentam uma penetração quase nula do óleo na espuma, ao contrário do que é verificado nos resultados experimentais. Assim, para efeitos de comparação, apenas foram considerados os instantes iniciais do processo de enchimento.

Na Figura 4.10 visualizam-se detalhadamente os perfis de velocidade/frente de enchimento na região livre do meio fibroso, para o caso em que $L_g = 0,01 \text{ m}$. Nas imagens observa-se inicialmente a formação de um perfil parabólico e, a meio do comprimento e na saída do canal esse perfil parabólico já está completamente definido, o que está em consonância com os resultados experimentais.

De salientar a grande dificuldade em o óleo penetrar o meio poroso nos resultados numéricos, situação não observada nos resultados experimentais.

Capítulo 5

Conclusões e sugestões para trabalho futuro

5.1 Contribuições deste trabalho

O âmbito deste trabalho foi o estudo do processo de enchimento de uma cavidade moldante parcialmente preenchida com um meio poroso. Para o efeito foi concebida, projectada e construída uma instalação laboratorial, no intuito de simular experimentalmente o referido enchimento.

A instalação laboratorial, inicialmente concebida e projectada, teve de sofrer algumas modificações, após terem sido realizados testes de vedação. Para além das fugas de fluido registadas, as placas maquinadas para a colocação de o-rings revelaram-se fragilizadas aquando da introdução de óleo para o interior da cavidade levando, inclusivamente, à fractura de uma delas. A substituição da placa fracturada por uma de maior espessura, o uso de grampos metálicos na estrutura “sanduíche” e a libertação da saída do molde permitiram utilizar, com maior segurança, pressões de enchimento mais elevadas. A utilização de papel de junta entre as placas, assim como a modificação da zona de recepção do terminal da conduta que provém do sistema da bombagem, revelaram-se eficazes no combate às (indesejáveis) fugas.

A aplicação de uma técnica experimental gravimétrica a várias amostras de espumas sujeitas a compressão (até perfazer 0,01 m de espessura), permitiu determinar a permeabilidade dessas espumas e escolher qual a que melhor se adaptava para o estudo deste trabalho. Concluiu-se que, e tendo em conta os ensaios para a espuma de poliéster de 30 ppi, a permeabilidade diminui à medida que aumenta a espessura inicial de uma espuma sujeita a compressão até ser atingida a mesma espessura final. Tendo em conta os valores das permeabilidades dos meios porosos mais frequentemente utilizados em processos RTM (e LCM em geral), foram escolhidas a espuma em poliuretano com 0,015 m de espessura e permeabilidade $8,23 \times 10^{-11} \text{ m}^2$, a espuma à base de poliéster de 30 ppi com espessura de

0,0125 m e permeabilidade $2,92 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ e a espuma à base de poliéster de 15 ppi com espessura 0,0125 m e $3,10 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ de permeabilidade.

A porosidade das espumas escolhidas para meio poroso também foi determinada experimentalmente. Os valores da porosidade obtidos revelaram-se muito baixos comparando com as porosidades da maioria das fibras utilizadas em RTM, nomeadamente os meios porosos de fibra de vidro que geralmente possuem valores de porosidade na ordem dos 80-90%. A espuma em poliuretano apresentou uma porosidade de 40,9%, a de 30 ppi de 45,5% e a de 15 ppi de 44,9%. O facto das paredes celulares da espuma de 15 ppi serem mais espessas do que as da espuma de 30 ppi, e a queda de água da espuma aquando do momento da pesagem devido ao seu elevado grau de abertura, podem justificar o valor de porosidade mais baixo relativamente à espuma de 30 ppi.

Em todos os escoamentos analisados experimentalmente foi observado um escoamento preferencial (“*race tracking*”) pelos canais livres do meio poroso. O valor de permeabilidade é mais elevado nessas zonas, oferecendo uma menor resistência ao escoamento. A velocidade do fluido nos “gaps” é maior.

A simulação experimental do processo de enchimento para diferentes velocidades de entrada (0,01 m/s e 0,02 m/s) permitiu concluir que, para a mesma espuma, os perfis de escoamento são ligeiramente mais vincados para o caso da velocidade mais elevada.

Para cada velocidade de entrada estudada, a espuma em poliuretano foi a que sempre apresentou um tempo de preenchimento mais elevado (60 segundos para a velocidade de 0,01 m/s e 24 segundos para a velocidade de 0,02 m/s), pois é a espuma que possui uma permeabilidade mais baixa ($8,23 \times 10^{-11} \text{ m}^2$) oferecendo uma resistência maior ao escoamento do fluido.

Nas experiências com as espumas em poliuretano e à base de poliéster de 30 ppi foi observado um escoamento transversal.

Verificou-se que ao aumentar a largura do “gap” ou ao diminuir a permeabilidade do meio poroso, o escoamento através dos canais laterais é mais intenso.

A simulação numérica foi realizada tendo em conta apenas as características da espuma em poliuretano, pelo facto desta ser mais representativa em relação ao que se passa na etapa de enchimento do processo RTM (características mais próximas das das fibras usadas em RTM). Além disso, essa simulação foi realizada assumindo a existência de

simetria física do problema, o que nem sempre foi possível de verificar experimentalmente devido à dificuldade em centrar a espuma no interior da cavidade moldante.

Para os primeiros instantes de tempo estudados, os resultados numéricos são relativamente concordantes com os experimentais no que diz respeito aos perfis de enchimento. No entanto, o avanço do óleo na espuma é quase nulo à medida que o tempo decorre levando a perfis de escoamento cada vez mais discrepantes relativamente aos dos resultados experimentais. Verifica-se também que o escoamento preferencial é mais vincado no caso numérico.

Perante tudo isto, conclui-se que é necessário melhorar e validar o modelo matemático e/ou numérico, pois os resultados numéricos ainda diferem substancialmente dos experimentais, e importa dispor destas ferramentas mais fiáveis para proceder à simulação numérica do processo RTM, ou processos análogos. Os resultados experimentais obtidos valem por si mesmos, já que não foi possível encontrar resultados experimentais na literatura que pudessem ser usados para avaliar a qualidade dos resultados da simulação numérica. Procurar-se-á disponibilizar estes resultados na literatura, a fim de poderem ser usados por quem estiver interessado na simulação numérica do processo de enchimento de domínios parcialmente preenchidos com um meio poroso, situação que tem merecido interesse crescente nos últimos tempos.

5.2 Sugestões para trabalho futuro

Os resultados obtidos neste trabalho podem ser o ponto de partida para diversos estudos complementares relativos à modelação numérica. Sugere-se investigar, em maior detalhe, a modelação matemática do problema em causa, averiguando eventualmente outras formas de tratamento simultâneo das duas zonas, preenchida e não preenchida com o meio poroso.

Bibliografia

Baliga, B.R., Control-volume finite element methods for fluid flow and heat transfer, W.J. Minkowycz, E.M. Sparrow Eds., *Advances in Numerical Heat Transfer*, **1**, Taylor&Francis, New York (1997)

Bower, M.V., Composite Materials, University of Alabama at Huntsville
<http://www.eng.uah.edu/~mbower/MAE476/Composites.PDF> (05/2007)

British Plastics Federation, Resin Transfer Moulding (RTM)
http://www.bpf.co.uk/bpfindustry/process_plastics_resin_transfer_moulding.cfm (04/2007)

Bruce McLaren Trust
http://www.bruce-mclaren.com/supporters_photo_gallery/photo_gallery.htm (06/2007)

Campbell, F.C., *Manufacturing Processes for Advanced Composites*, Elsevier, Oxford (2004)

Conservatório Souza Lima
http://www.souzalima.com.br/patrocinio_vela.html (06/2007)

Costa, V.A.F, Oliveira, L.A., Figueiredo, A.R., A control volume based finite element method for three-dimensional incompressible turbulent fluid flow, heat transfer, and related phenomena, *Int. J. Num. Methods Fluids*, **21**, 7, 591-613 (1995)

Costa, V.A.F., Numerical simulation of the filling process in domains partially filled with porous media. G. De Vahl Davis & E. Leonardi, Eds., *Proc. Third International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer (CHT-04)*, 184-206, Begell House, New York (2004)

Costa, V.A.F., Oliveira, L.A., Baliga, B.R., Sousa, A.C.M., Simulation of coupled flows in adjacent porous and open domains using a control-volume finite-element method, *Numerical Heat Transfer*, **45**, 675-697 (2004)

Eckold, G., *Design and Manufacture of Composite Structures*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge (1994)

Freitas, M., Silva, A., Materiais Compósitos, I.S.T.

http://in3.dem.ist.utl.pt/mscdesign/02ed/01materiais/pres7_1.pps# (03/2007)

Hammami, A., Gauvin, R., Trochu, F., Modeling the edge effect in liquid composites molding, *Composites: Part A*, **29A**, 603-609 (1998)

Han, K.; Wu, C.H.; Lee, L.J., Characterization and simulation of resin transfer molding – race tracking and dry spot formation, *Advanced Composites Technologies*, 19-36 (1993)

Incropera, F.P., DeWitt, D.P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 5th Ed., John Wiley & Sons, New York (2002)

Incropera, F.P., DeWitt, D.P., *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*, 4^a Ed., LTC editora (1998)

Jang, B.Z., *Advanced Polymer Composites*, ASM International, Materials Park (OH) (1994)

Kaviany, M., *Principles of Heat Transfer in Porous Media*, 2nd Ed., Springer Verlag, New York (1995)

Lee, C., Wei K., Curing Kinetics and Viscosity Change of a Two-Part Epoxy Resin During Mold Filling in Resin-Transfer Molding Process, *J. Appl. Polym Sci*, **77**, 2139-2148 (2000)

Liquid Resin Molding, Composite Materials and Processes, Georgia Institute of Technology

<http://www.me.gatech.edu/jonathan.colton/me4793rtm.pdf> (05/2007)

Ni, J., S., B., S., M., *Analysis of Two-Region Flow in Liquid Composite Molding Processes*, Ph.D. Thesis, The Ohio State University (1996)

RTM (Resin Transfer Molding)

<http://course1.winona.edu/kdennehy/ENGR390Topicsrtm.ppt> (03/2007)

Rudd, C.D., Long, A.C., Kendall, K.N., Mangin, C.G.E., *Liquid Moulding Technologies*, Woodhead Publishing Limited, London (1997)

Shojaei, A.; Ghaffarian, S.R.; Karimian, S.M.H., Three-dimensional process cycle simulation of composite parts manufactured by resin transfer molding, *Composite Structures*, **65**, 381-390 (2004)

Smith, W.F., *Principles of Materials Science and Engineering*, 3rd Ed., McGraw-Hill, New York (1996)

Summerscales, J., Extrusion, Injection Moulding, Resin Transfer Moulding

<http://www.tech.plym.ac.uk/sme/mats324/PowerPoint/MATS324C6%20RTM.ppt>
(04/2007)

Wu, L., Jia, Process Modeling of Resin Transfer Molding

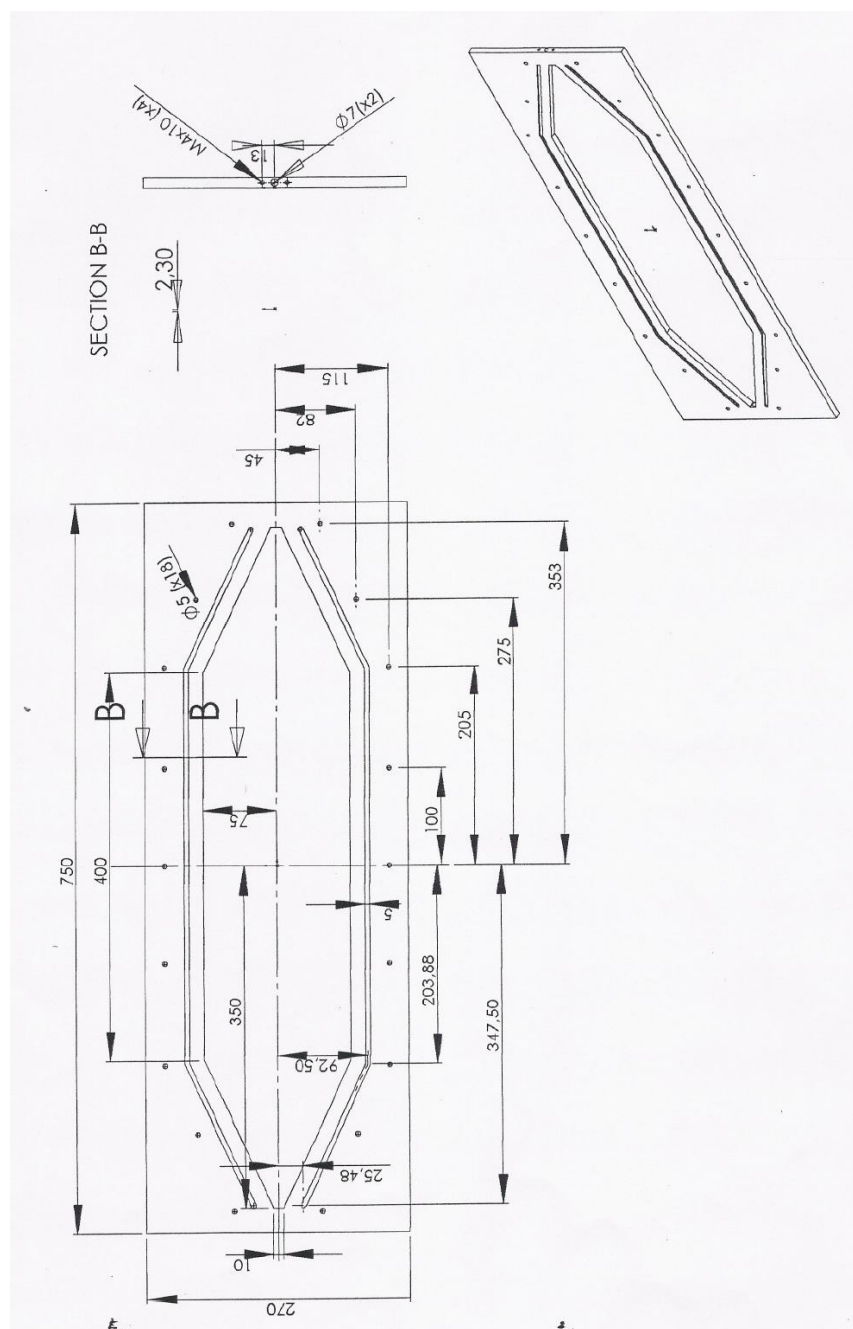
<http://best.me.berkeley.edu/~jialong/courses/ME227/termpaper.doc> (04/2006)

Yaws, C.L., *Chemical Properties Handbook*, McGraw-Hill Handbooks, New York (1999)

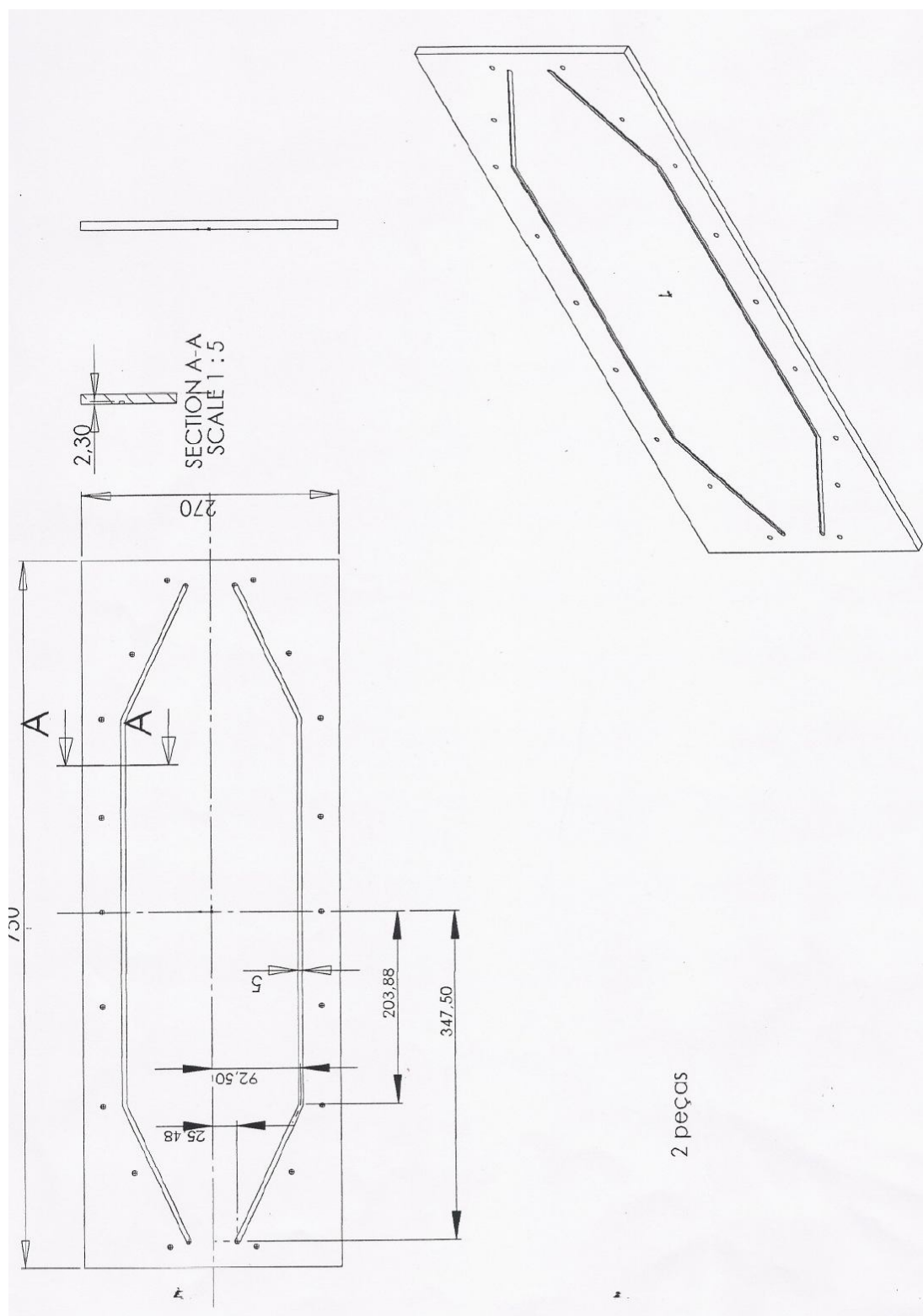
Apêndice

A.1 Desenhos técnicos ilustrativos das peças que constituem a célula acrílica

➤ Placa interior



➤ Placas do topo e da base – 2 peças iguais



Nota: As dimensões das peças são lidas em *mm*

A.2 Ficha técnica do óleo

Shell Tellus

Next Generation

Óleos hidráulicos de alta performance



Descrição e Aplicação

Lubrificantes hidráulicos altamente refinados, de qualidade premium, amplamente reconhecidos no campo industrial por seu elevado poder de lubrificação.

Formulados com óleos básicos selecionados e um pacote de aditivos especiais, pode ser aplicado em sistemas hidráulicos industriais e marítimos, bem como em sistemas de transmissão de força veiculares.

Benefícios

• Estabilidade térmica

Termicamente estável em sistemas modernos que operam sob condições extremas de temperatura e carga. Sua elevada resistência à degradação e formação de borra, garante melhor limpeza e confiabilidade do sistema.

• Resistência à oxidação

Resiste à oxidação em presença de ar, água e cobre. Os resultados do TOST (Turbine Oil Stability Test) mostraram excelente performance para a linha Tellus, sendo possível proporcionar extensão no intervalo de troca e redução nos custos de manutenção.

• Estabilidade hidrolítica

Elevada estabilidade química, mesmo em presença de umidade, o que garante maior vida útil para o óleo e reduz o risco de corrosão.

• Excelente performance antidesgaste

Proteção antidesgaste sob uma ampla faixa de condições de operação, mesmo quando sujeito a cargas severas. Excelente performance em vários testes em bombas de pistão e palheta, incluindo o resistente Denison T6C (versões seca e úmida) e Vickers 35VQ25. Possibilidade de aumento na vida útil dos componentes do sistema.

• Superior filtrabilidade

Apropriado para filtração ultra-fina, uma exigência dos sistemas hidráulicos atuais. Não é afetado pelos contaminantes comuns como água e cálcio, conhecidos por contribuírem para

o entupimento de filtros presentes nos sistemas hidráulicos. Possibilidade de uso de filtros mais finos, garantindo com isso todos os benefícios do uso de óleos com elevado nível de limpeza.

• Baixa fricção

Proporciona excelente propriedade de lubrificação e características anti-fricção, em sistemas hidráulicos operando sob alta ou baixa velocidade. Previne contra o emperramento em aplicações críticas, garantindo controle preciso do equipamento.

• Propriedades antiespumantes

Aditivos cuidadosamente selecionados garantem a rápida liberação de ar sem a formação excessiva de espuma. Essa propriedade permite a minimização da cavitação e retarda a oxidação, mantendo a performance do sistema e do fluido.

• Boa demulsibilidade

Resiste à formação de emulsão e previne conseqüentemente danos ao sistema hidráulico e a bomba.

Aprovações / Recomendações

Possui as seguintes aprovações:

- CINCINNATI P-68 (ISO 32)
- CINCINNATI P-70 (ISO 46)
- CINCINNATI P-69 (ISO 68)
- DENISON HF-0
- DENISON HF-1
- DENISON HF-2
- Eaton (Vickers) M-2950 S
- Eaton (Vickers) I-286 S

Atende às exigências de:

- DIN 51524 parte 2
- ISO 11158
- AFNOR NF-E 48-603
- Mannesman Rexroth RE 90 220-1
- Swedish Standard SS 15 54 34 AM

Compatibilidade

1

Revisão: 01/04

Todas as informações contidas nesse folheto baseiam-se em dados disponíveis na época de sua publicação. Reservamo-nos o direito de fazer modificações a qualquer momento, tanto no produto quanto na sua informação, sem prévio aviso.

Shell Tellus

Next Generation

Óleos hidráulicos de alta performance



Shell Tellus é compatível com todos os componentes hidráulicos presentes mercado. Certifique-se, entretanto, junto ao seu Representante Comercial, quando for utiliza-lo em bombas com elementos de prata. É compatível com selos, vedações e tintas normalmente especificados para utilização com óleos minerais.

Saúde e Segurança

Para evitar danos ao indivíduo ou ao meio ambiente, utilize o produto de forma adequada e siga corretamente as indicações do fabricante do equipamento. Para seu maior conforto, solicite a "Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos".

Embalagens

- Caixa 4 x 4 L (somente Tellus 68)
- Balde de 20 L
- Granel
- Tambor de 200 L
- Tambor de 1000 L (somente Tellus 68)

Atendimento ao Cliente

Para mais informações, entre em contato com o nosso Centro de Serviços ao Cliente Shell através da linha gratuita: **0800 781616**, ou pelo correio eletrônico **fale@shell.com**. Visite nosso site no endereço **www.shell.com.br**.

Características Típicas

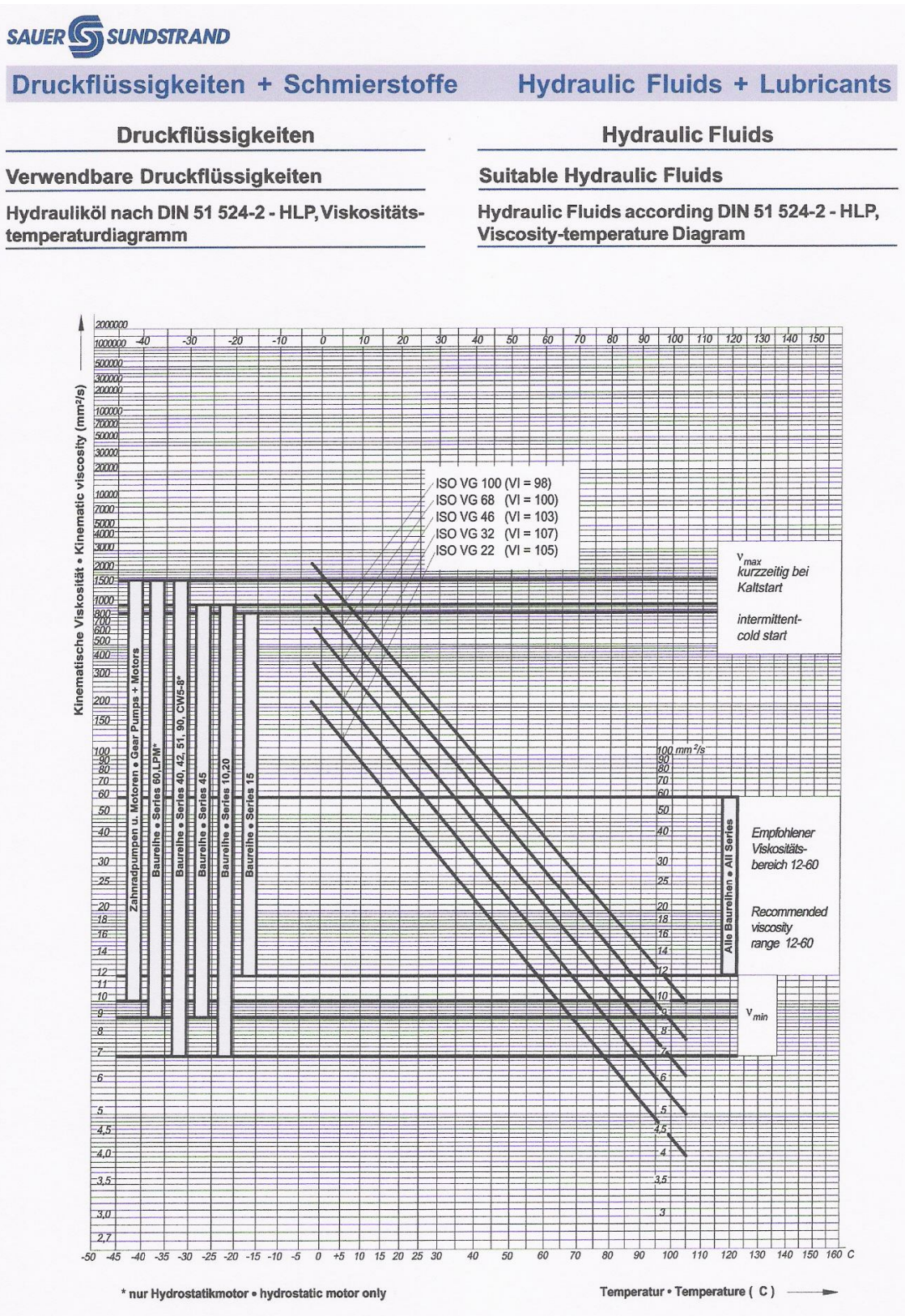
Grau ISO	32	46	68	100
Densidade a 20/4 °C – ASTM D-1298	0,8718	0,8765	0,8811	0,8804
Visc. Cinemática a 40 °C, cSt – ASTM D-445	32,09	47,62	69,90	99,40
Visc. Cinemática a 100 °C, cSt – ASTM D-445	5,40	6,93	8,89	11,05
Índice de Viscosidade – ASTM D-2270	102	101	100	95
Ponto de Fulgor COC, °C – ASTM D-92	204	234	254	268
Ponto de Fluidez, °C – ASTM D-97	-27	-24	-24	-21
TAN, mg KOH/g – ASTM D-974	0,38	0,38	0,38	0,38

2

Revisão: 01/04

Todas as informações contidas nesse folheto baseiam-se em dados disponíveis na época de sua publicação. Reservamo-nos o direito de fazer modificações a qualquer momento, tanto no produto quanto na sua informação, sem prévio aviso.

- Relação entre a viscosidade cinemática e a temperatura para diversos tipos de óleo “Shell Tellus”



A.3 Cálculo das permeabilidades

Para cada amostra de espuma foram obtidos, através do sistema de aquisição, dados relativos às variáveis tempo e massa. Através da aplicação do método dos mínimos quadrados foi possível ajustar esses mesmos dados a uma recta da forma $y = m.x + b$, cujo declive m representa a taxa de variação de massa com o tempo, isto é, o caudal mássico. Os dados massa *versus* tempo assim como as rectas resultantes da aplicação do método dos mínimos quadrados para cada ensaio estão representados nas figuras que se seguem.

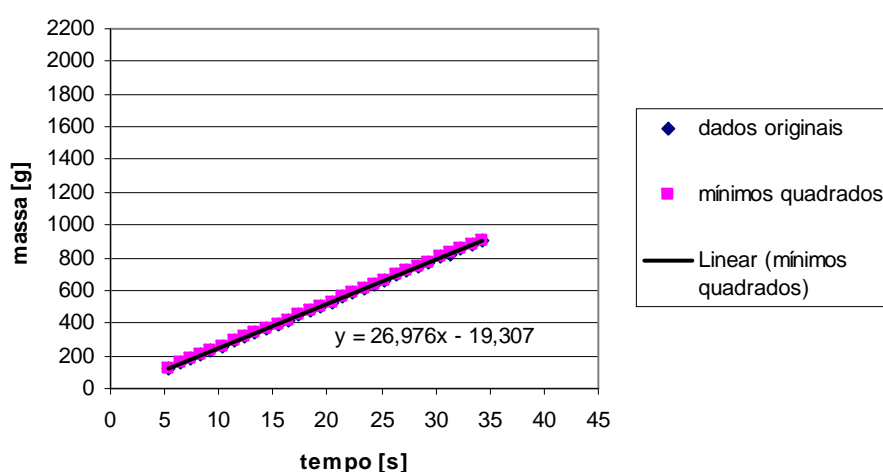


Figura III.1 Representação dos dados obtidos relativos às variáveis tempo *versus* massa e representação da recta resultante da aplicação do método dos mínimos quadrados a esses dados para o ensaio 1.

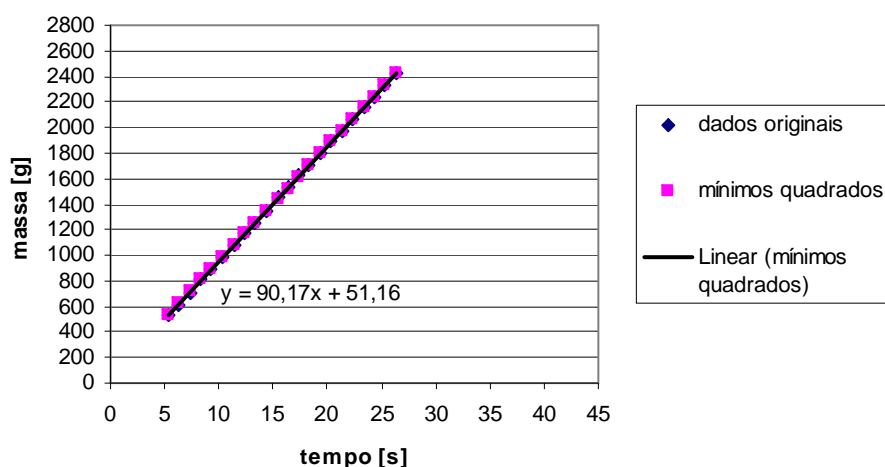


Figura III.2 Representação dos dados obtidos relativos às variáveis tempo *versus* massa e representação da recta resultante da aplicação do método dos mínimos quadrados a esses dados para o ensaio 2.

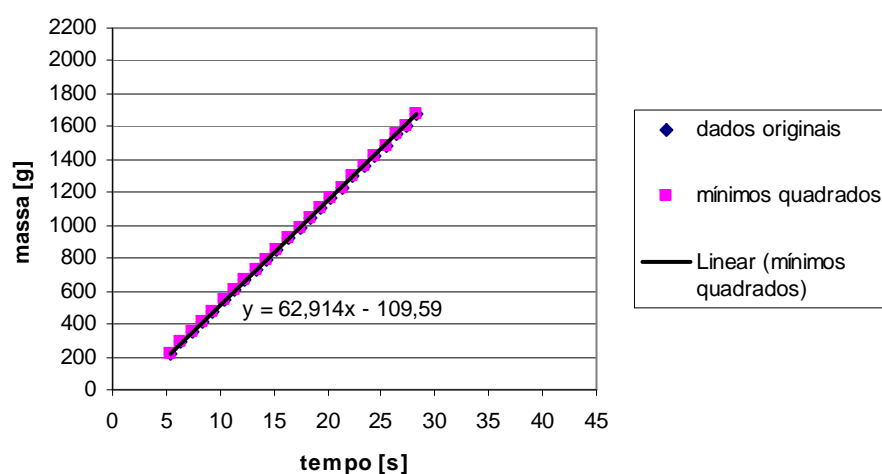


Figura III.3 Representação dos dados obtidos relativos às variáveis tempo *versus* massa e representação da recta resultante da aplicação do método dos mínimos quadrados a esses dados para o ensaio 3.

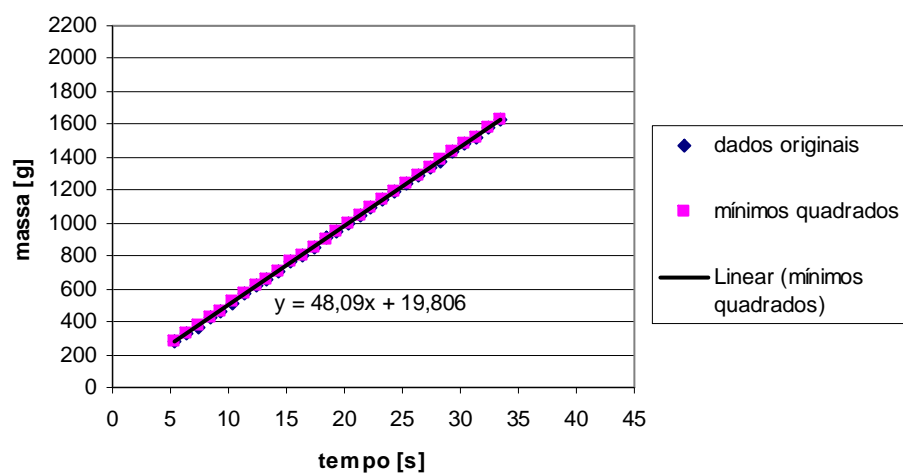


Figura III.4 Representação dos dados obtidos relativos às variáveis tempo *versus* massa e representação da recta resultante da aplicação do método dos mínimos quadrados a esses dados para o ensaio 4.

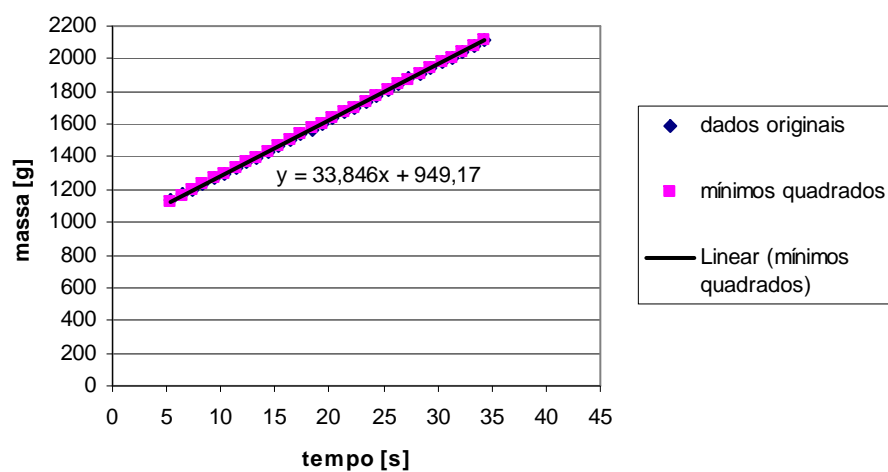


Figura III.5 Representação dos dados obtidos relativos às variáveis tempo *versus* massa e representação da recta resultante da aplicação do método dos mínimos quadrados a esses dados para o ensaio 5.

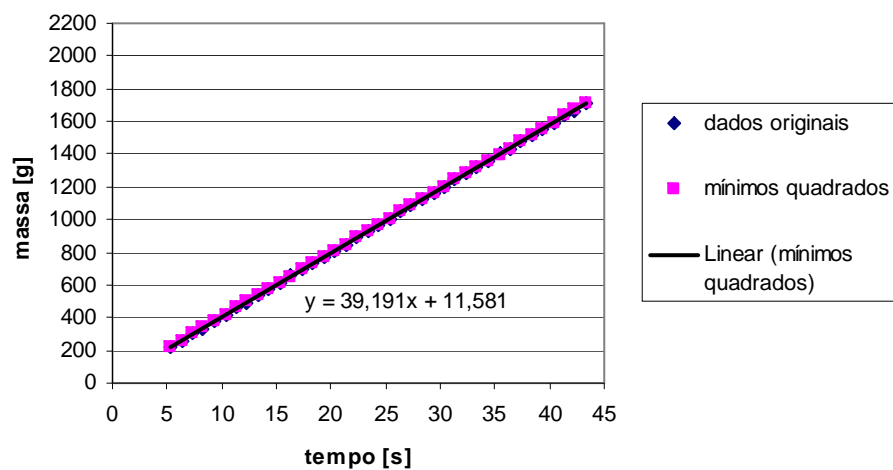


Figura III.6 Representação dos dados obtidos relativos às variáveis tempo *versus* massa e representação da recta resultante da aplicação do método dos mínimos quadrados a esses dados para o ensaio 6.

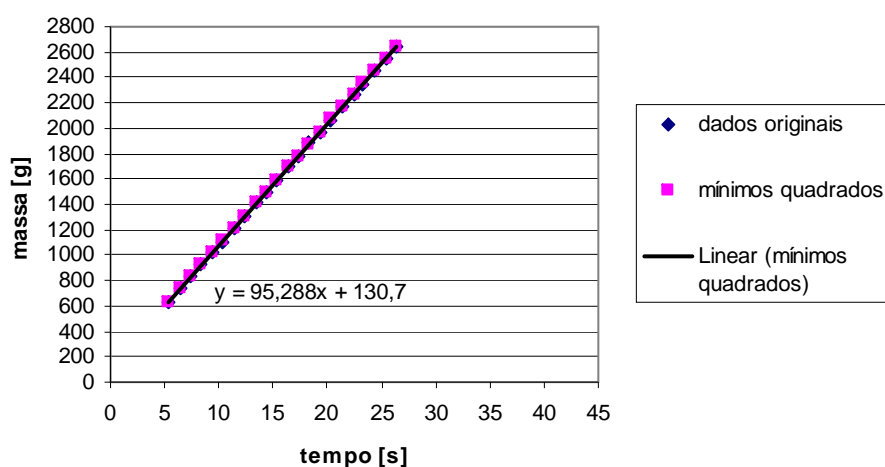


Figura III.7 Representação dos dados obtidos relativos às variáveis tempo *versus* massa e representação da recta resultante da aplicação do método dos mínimos quadrados a esses dados para o ensaio 7.

Os parâmetros m (declive) e b (ordenada na origem) de cada recta resultante da aplicação do método encontram-se compilados na Tabela III.1.

Tabela III.1 Compilação dos parâmetros m (declive) e b (ordenada na origem) de cada recta resultante da aplicação do método dos mínimos quadrados.

Tipo de espuma	ensaio	Espessura inicial, e_0 (m)	Espessura final, e_f (m)	m (g/s)	b (g)
poliuretano	1	0,015	0.01	26,98	-19,31
poliéster 30 <i>ppi</i>	2	0,0125		90,17	51,16
	3	0,03		62,91	-109,59
	4	0,04		48,09	19,81
	5	0,05		33,85	949,17
poliéster 20 <i>ppi</i>	6	0,05		39,19	11,58
poliéster 15 <i>ppi</i>	7	0,0125		95,29	130,70

A esquematização das cotas envolvidas na montagem experimental para a determinação das permeabilidades está representada na Figura III.5.

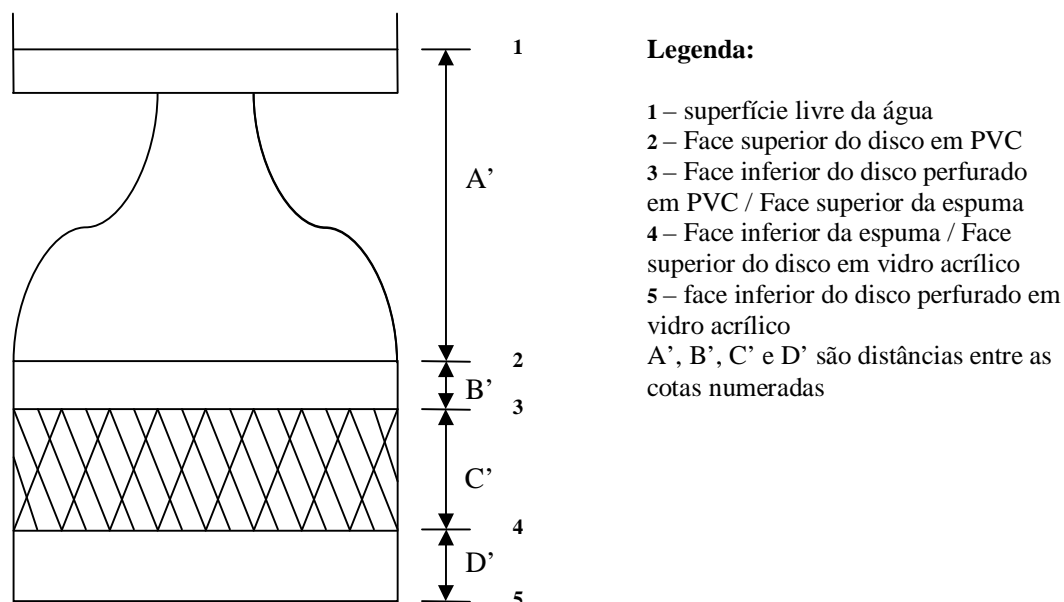


Figura III.8 Cotas envolvidas na montagem experimental para a determinação das permeabilidades.

O nível em 1 corresponde à superfície livre da água no recipiente. A distância compreendida entre os pontos 1 e 2 (distância A') corresponde ao percurso da água entre a superfície livre e a face do disco em PVC. Entre 2 e 3 (distância B') a água atravessa os furos do disco de PVC. A amostra de espuma refere-se à malha compreendida entre os pontos 3 e 4 (distância C'). Por fim, entre os pontos 4 e 5 (distância D') a água atravessa o disco em vidro acrílico.

Aplicando o Teorema Fundamental da Hidrostática tem-se,

$$\Delta p = p_2 - p_1 = \rho g A'$$

p_2 é a pressão correspondente ao ponto 2, p_1 é a pressão correspondente ao ponto 1, ρ é a massa volúmica da água a 20 °C e g é a aceleração da gravidade.

$$p_3 - p_2 = \rho g B' - \frac{Q_m}{N_1} \times \frac{128 \cdot \mu \cdot B'}{\rho \cdot \pi \cdot D_f^4}$$

onde $\frac{Q_m}{N_1} \times \frac{128 \cdot \mu \cdot B'}{\rho \cdot \pi \cdot D_f^4}$ é a perda de carga devida ao escoamento de água nos furos da placa em PVC (escoamento de Hagen-Poiseille), Q_m é o caudal mássico, N_1 é o número de furos no disco de PVC, μ é a viscosidade dinâmica e D_f é o diâmetro dos furos.

$$p_4 - p_3 = \rho g C' - \frac{4 \cdot \mu \cdot Q_m C'}{K \cdot \rho \cdot \pi \cdot D_i^2}$$

onde $\frac{4 \cdot \mu \cdot Q_m C'}{K \cdot \rho \cdot \pi \cdot D_i^2}$ corresponde à perda de carga devida ao escoamento no meio poroso (lei de Darcy), e D_i é o diâmetro interno do porta-amostras.

$$p_5 - p_4 = \rho g D' - \frac{Q_m}{N_2} \times \frac{128 \cdot \mu \cdot D'}{\rho \cdot \pi \cdot D_f^4}$$

onde $\frac{Q_m}{N_2} \times \frac{128 \cdot \mu \cdot D'}{\rho \cdot \pi \cdot D_f^4}$ é a perda de carga devida ao escoamento nos furos da placa em vidro acrílico (escoamento de Hagen-Poiseille). N_2 é o número de furos do disco em acrílico.

Explicitando as pressões p_2 , p_3 , p_4 e p_5 , substituindo todos os valores e igualando $p_1 = p_5 = p_{atm}$, retira-se o valor de K para cada amostra, que é dado pela seguinte expressão:

$$K = \frac{(4 \times C')}{D_i^2} \times \frac{1}{\frac{(\rho^2 g \pi (A' + B' + C' + D'))}{Q_m \mu} - \frac{128}{D_f^4} \left(\frac{B'}{N_1} + \frac{D'}{N_2} \right)}$$

Os dados necessários à resolução das equações anteriores estão compilados nas Tabelas III.2 e III.3.

Tabela III.2 Compilação dos dados do porta-amostras.

Dados do porta-amostras		
diâmetro interno do porta-amostras, D_i		0,0474 m
disco em PVC	Espessura, B'	0,004 m
	número de furos, N_I	72
	diâmetro dos furos, D_f	0,0015 m
disco em acrílico	espessura, D'	0,0088
	número de furos, N_2	56
	diâmetro dos furos, D_f	0,0015 m

Tabela III.3 Compilação de outros dados necessários ao cálculo das permeabilidades.

Outros dados	
distância A'	0,1641 m
distância C' (espessura interior do molde)	0,01 m
viscosidade dinâmica da água a 20 °C, μ	9,59E-04 kg/(m.s)
massa volúmica da água a 20 °C, ρ	998,2 kg/m ³
aceleração da gravidade, g	9,8 m/s ²

A.4 Cálculo das porosidades

Para efectuar o cálculo das porosidades é necessário conhecer os valores das massas volúmicas da água e do ar ($\rho_{\text{água}}$ e ρ_{ar}).

Tabela IV.1 Massas volúmicas da água e do ar.

Substância	Temperatura (°C)	Massa Volúmica (kg / m^3)
água	20	998,2 (Incropera e DeWitt, 2002)
ar	20	1,193 (Incropera e DeWitt, 1998)

Coloca-se a amostra seca no porta-amostras, comprime-se de modo a obter a espessura de 0,01m e procede-se à sua pesagem. Repete-se o mesmo procedimento para a amostra de espuma saturada com água. O erro associado à balança é de $\pm 0,1$ g.

As massas obtidas para os diferentes conjuntos amostra+porta-amostras estão compiladas na tabela seguinte.

Tabela IV.2 Massas obtidas dos conjuntos amostra+porta-amostras.

Amostra	Massa da amostra seca (kg)	Massa da amostra saturada com água (kg)
poliuretano	0,1958	0,2030
Poliéster 30ppi	0,1972	0,2052
Poliéster 15ppi	0,1980	0,2059

As equações utilizadas para o cálculo das porosidades são,

$$massa_1 = m_{p-amostras} + m_{sólido} + m_{ar} \quad (\text{espuma saturada com ar})$$

$$massa_2 = m_{p-amostras} + m_{sólido} + m_{\text{água}} \quad (\text{espuma saturada com água})$$

$$massa_2 - massa_1 = m_{água} - m_{ar} \Leftrightarrow massa_2 - massa_1 = \rho_{água} \times V_{água} - \rho_{ar} \times V_{ar}$$

Como $V_{água} = V_{ar} = V_{vazios}$ então,

$$massa_2 - massa_1 = (\rho_{água} - \rho_{ar}) \times V_{vazios} \text{ de onde se retira } V_{vazios} = \frac{massa_2 - massa_1}{\rho_{água} - \rho_{ar}}$$

$$V_{total} = V_{amostra} = \frac{\pi \cdot D_i^2}{4} \times 0,01$$

A porosidade é então calculada pela seguinte expressão,

$$\varepsilon = \frac{V_{vazios}}{V_{total}}$$

A.5 Filmes obtidos para cada um dos processos de enchimento

Os filmes obtidos para cada um dos processos de enchimentos encontram-se disponíveis no CD anexo a esta dissertação.